



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

# **ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO HIGROTÉRMICO DE UN MURO DE TAPIA MEDIANTE MONITORIZACIÓN Y SIMULACIÓN ENERGÉTICA.CASO DE ESTUDIO: VIVIENDA UNIFAMILIAR EN MONFORTE DE LEMOS.**

AUTOR: LUCÍA RIVAS RODRÍGUEZ

---

Trabajo Fin de Máster Universitario en Tecnologías de Edificación Sostenible

Directores: D. Santiago López Piñeiro

D. Juan Luis Pérez Ordóñez

A Coruña, Septiembre 2015



## **RESUMEN**

El presente documento desarrolla la metodología llevada a cabo para la implantación de un sistema de monitorización mediante sensores de bajo coste, no destructivo y capaz de registrar y almacenar datos de magnitudes físicas, aplicable a cualquier elemento constructivo existente.

Se fundamenta en la necesidad del desarrollo de metodologías que permitan la caracterización de edificios o elementos constructivos desde el punto de vista bioclimático y así plantear una rehabilitación más eficaz.

La instalación experimental se lleva a cabo en la segunda planta de una vivienda unifamiliar ubicada en Monforte de Lemos, provincia de Lugo. Como características constructivas de la misma destacan los cerramientos a base de muros de tapia, carpinterías de madera y cubierta de teja árabe. La vivienda se sitúa en casco urbano y además dentro de un área de especial protección. Se plantea la monitorización del muro de tapia de la fachada sur de la vivienda.

Se registraron datos de temperaturas y humedad, aunque las posibilidades del sistema son casi ilimitadas dependiendo del tipo de sensor que se utilice.

El trabajo, además de la metodología de monitorización, describe el registro y tratamiento de los datos obtenidos así como el análisis de resultados y conclusiones obtenidas.

Palabras clave: Arquitectura en tierra, comportamiento higrotérmico, humedad, temperatura, ensayos no destructivos, Raspberry Pi2, DHT22, DALLAS DS18B20





## RESUMO

O presente documento desenvolve a metodoloxía levada a cabo para a implantación dun sistema de monitorización mediante sensores de baixo custe, non destrutivo e capaz de rexistrar e almacenar datos de magnitudes físicas, aplicable a calquera elemento construtivo existente.

Fundaméntase na necesidade do desenrolo de metodoloxías que permitan a caracterización de edificios ou elementos construtivos dende o punto de vista bioclimático así plantexar una rehabilitación máis eficaz

A instalación experimental levouse a cabo no segundo andar dunha vivenda unifamiliar ubicada en Monforte de Lemos, provincia de Lugo. Como características construtivas da mesma destacan os cerramentos a base de muros de tapia, carpinterías de madeira e cuberta de tella árabe. A vivenda sitúase no casco urbano e ademais dentro dunha área de especial protección. Plántesaxe a monitorización do muro de tapia da fachada sur da vivenda.

Rexístráronse datos de temperaturas e humidade, aínda que as posibilidades do sistema son case ilimitadas dependendo do tipo de sensor que se empregue.

O traballo, ademais da metodoloxía de monitorización, describe o rexistro e tratamento dos datos obtidos así como a análise dos mesmos e conclusións obtidas.

Palabras clave: Arquitectura en terra, comportamento higratérmico, humidade, temperatura, ensaios non destrutivos, Raspberry Pi2, DHT22, DALLAS DS18B20



## **ABSTRACT**

This paper develops the methodology undertaken for the implantation of a monitoring system using low-cost sensors, non-destructive and capable of recording and storing data of physical quantities, applicable to any existing construction element.

It is based on the need to develop methodologies for the characterization of buildings or building elements from the bioclimatic point of view and thus pose a more effective rehabilitation

The experimental setup is performed on the second floor of a house located in Monforte de Lemos, Lugo. As of the same construction features include rammed earth walls, wood carpentry and Arab-tile roof. The house is in town and also within an area of special protection. Monitoring south facade of the house is considered.

Temperature and humidity data were recorded, but the possibilities are limitless system depending on the type of sensor we use.

The work, in addition to the monitoring methodology, describes the recording and processing of the data and the analysis of results and conclusions.

Keywords: Earth architecture, hygrothermal performance, temperature, non-destructive testing, Raspberry Pi2, DHT22, DALLAS DS18B20.



# ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	11
ÍNDICE DE TABLAS.....	12
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	13
ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS.....	16
INTRODUCCIÓN.....	21
<b>CAPÍTULO 1: ESTADO DE LA CUESTIÓN .....</b>	<b>23</b>
1.1. EL SISTEMA CONSTRUCTIVO. ....	23
1.1.1. Origen.....	23
1.1.2. Materiales .....	25
1.1.3. Técnicas.....	37
1.2. EL ESTUDIO.....	59
1.2.1. Métodos operatorios .....	59
1.3.1. Estudios previos y experiencias de otros autores.....	60
<b>CAPÍTULO 2: FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....</b>	<b>95</b>
2.1. CALOR Y TEMPERATURA .....	95
2.2. FLUJO DE CALOR .....	96
2.2.1. Conducción.....	96
2.2.2. Convección.....	97
2.2.3. Radiación.....	97
2.3. EL CONFORT TÉRMICO .....	98
2.3.1. Definición.....	98
2.3.2. La humedad ambiente: psicrometría.....	102
2.3.3. El confort térmico. Balance térmico.....	104
2.3.4. Factores que influyen en el confort.....	105
2.3.5. índices y zonas de confort.....	107
2.4. COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LOS EDIFICIOS.....	108
2.3.6. Cálculo de la radiación solar.....	109
2.3.7. Ganancias por radiación solar.....	109
2.3.8. Flujo en estado estacionario.....	111
2.3.9. Respuesta dinámica de los edificios.....	113
2.3.10. El efecto de la masa térmica .....	116
2.5. EL CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN. DB HE: AHORRO DE ENERGÍA.	117
2.3.11. Limitación del consumo energéticoDB HE 0 .....	119
2.3.12. Limitación de la demanda energética DB HE 1.....	120
<b>CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA.....</b>	<b>123</b>
3.1. MONITORIZACIÓN. ....	123
3.1.1. Objetivos de la monitorización.....	123
3.1.2. Planeamiento de la monitorización.....	123

3.1.3.	Diseño del experimento.....	124
3.1.4.	Descripción de los equipos de medida.....	125
3.2.	INSTALACIÓN DE LOS SENSORES.....	145
3.1.5.	Instalación interior.....	148
3.1.6.	Instalación exterior.....	164
3.3.	FRECUENCIA DE LECTURA Y REGISTRO.....	171
3.4.	HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS DE DATOS.....	172
3.1.7.	Análisis de los datos obtenidos.....	172
3.1.8.	Modelado de los datos obtenidos. Gráficos.....	172
3.5.	PRUEBAS, PROBLEMAS Y SOLUCIONES.....	173
<b>CAPÍTULO 4: CASO DE ESTUDIO.....</b>		<b>175</b>
4.1.	DESCRIPCIÓN DE LA EDIFICACIÓN.....	175
4.2.	DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE.....	177
4.3.	DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO Y CALENDARIO.....	177
4.4.	ESQUEMAS DE INSTALACIÓN DE LOS SENSORES:.....	179
4.5.	DATOS CLIMÁTICOS DISPONIBLES.....	180
4.6.	VARIABLES DE MEDIDA.....	181
<b>CAPÍTULO 5: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>		<b>182</b>
5.1.	CUMPLIMIENTO DEL CTE.....	182
5.2.	REGISTRO DE LOS SENSORES.....	186
5.2.1.	Lecturas 11 de agosto de 2015.....	186
5.2.2.	Lecturas 13 de agosto de 2015.....	190
5.3.	ANÁLISIS DE TEMPERATURAS.....	194
5.3.1.	Análisis de temperaturas 11 de agosto de 2015.....	195
5.3.2.	Análisis de temperaturas 13 de Agosto de 2015.....	202
5.3.3.	Conclusiones análisis temperatura:.....	209
5.4.	ANÁLISIS DE LA HUMEDAD RELATIVA.....	210
5.4.1.	Humedad 11 de agosto de 2015.....	211
5.4.2.	Humedad 13 Agosto de 2015.....	214
5.4.3.	Conclusiones análisis humedad.....	217
<b>CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES.....</b>		<b>218</b>
<b>CAPÍTULO 7: FUTUROS DESARROLLOS.....</b>		<b>220</b>
<b>PRESUPUESTO.....</b>		<b>222</b>
<b>ANEXOS.....</b>		<b>223</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>		<b>246</b>

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Palacio de Tell Brak ( <a href="http://www.historiaantigua.es">www.historiaantigua.es</a> ) .....	23
Ilustración 2: Palacio de Mari ( <a href="http://www.nationalgeographic.com">www.nationalgeographic.com</a> ) .....	24
Ilustración 3: «Los Jardines Colgantes de Babilonia», Martin Heemskerck .....	24
Ilustración 4: Diagrama triangular de texturas (Guitian Ojea, y otros, 1982) .....	34
Ilustración 5: Munsell color charts(Jordán, 2014) .....	35
Ilustración 6: Arcillas. III Xornadas Bioconstrucción: Con Terra. Aplicacións Construtivas. Organiza Espiga: Asociación Galega para a Bioconstrución. (Elaboración propia) .....	35
Ilustración 7: Perfil 1129: Rivas Altas, Monforte de Lemos(Guitian Ojea, y otros, 1982) .....	39
Ilustración 8: Tapial tradicional de la comarca de Els Ports de Castellón. (Font & Hidalgo, 2009) .....	41
Ilustración 9: Sitios donde hay tradición de construcción con tierra (CRATerre).....	42
Ilustración 10: Biblioteca Sublette County ( <a href="http://sirewall.com">sirewall.com</a> ) .....	56
Ilustración 11: NK'MIP desert interpretive center, Canadá ( <a href="http://sirewall.com">sirewall.com</a> ) .....	56
Ilustración 12: Esquema fachada monitorizada CS1. ....	63
Ilustración 13: Ilustración 3: Esquema fachada monitorizada CS2.....	64
Ilustración 14: Esquema fachada monitorizada CS3. ....	65
Ilustración 15: Comportamiento térmico de cerramientos compuestos de tierra apisonada y aislamiento a base de poliestireno. (Hall, 2008) .....	92
Ilustración 16: Líneas interpretación diagrama psicrométrico ( <a href="http://www.fastonline.org">www.fastonline.org</a> ) .....	103
Ilustración 17: Diagrama psicrométrico con líneas SET (Szokolay, 2004) .....	104
Ilustración 18: Raspberry Pi2 GPIO header ( <a href="http://www.dynamoelectronics.com">www.dynamoelectronics.com</a> ) .....	133
Ilustración 19: Esquema conexión de varios DS18B20 a la RPI ( <a href="http://REUK.co.uk">REUK.co.uk</a> ) .....	136
Ilustración 20: Script sensor DALLAS DS18B20 (elaboración propia) .....	139
Ilustración 21: Esquema conexión de DHT22 ( <a href="http://www.Adafruit.com">www.Adafruit.com</a> ) .....	142
Ilustración 22: The pigpio library ( <a href="http://abyz.co.uk/rpi/pigpio/">http://abyz.co.uk/rpi/pigpio/</a> ) .....	143
Ilustración 23: Script sensor DHT22(elaboración propia) .....	144
Ilustración 24: Esquema instalación sensores (interior) (elaboración propia) .....	145
Ilustración 25: Esquema instalación sensores exterior (elaboración propia). ....	146
Ilustración 26: Esquema instalación sensores interior muro (elaboración propia) .....	146
Ilustración 27: Sensor ambiente exterior (elaboración propia) .....	170
Ilustración 28: Cerramiento monitorizado SV (elaboración propia).....	177
Ilustración 29: Esquema instalación sensores exterior (elaboración propia) .....	179
Ilustración 30: Esquema instalación sensores exterior (elaboración propia) .....	179
Ilustración 31: Esquema instalación sensores interior muro (elaboración propia) .....	180

Ilustración 32: Variables de observación humedad relativa (elaboración propia) .....	211
--	-----

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Emisiones de CO <sub>2</sub> (Bestraten & Hormías, 2011).....	26
Tabla 2: Clasificación de los componentes de un suelo en función del tamaño máximo de sus partículas (UNE-EN ISO 14688-1:2003) .....	29
Tabla 3: Caracterización de suelos según la prueba de la cinta (Baulúz, y otros, 1992) .....	37
Tabla 4: Caracterización de suelos según la prueba del rollito (Baulúz, y otros, 1992) .....	37
Tabla 5: Tabla para la elección de estabilizantes. (Baulúz & Bárcena, 1992) .....	43
Tabla 6: Temperaturas exteriores máx., mín. y medias para los tres casos de estudio. Datos procedentes de Hélder Silvano Neves - MeteoAbrantes.....	62
Tabla 7: Períodos de monitorización. ....	66
Tabla 8: Características térmicas cerramientos estudiados (Cavero & Jové, 2013).....	76
Tabla 9: Demanda de calefacción. (Cavero & Jové, 2013).....	77
Tabla 10: Demanda refrigeración. (Cavero & Jové, 2013).....	77
Tabla 11: Demanda anual. (Cavero & Jové, 2013) .....	77
Tabla 12: Tabla de registro termohigrómetro. (Metodología de inspección higrotérmica para la determinación de un factor intensidad de evaporación en edificios históricos, 2012) .....	80
Tabla 13: Promedio analítico de flujo térmico y temperaturas. Verano.....	84
Tabla 14: Promedio analítico de flujo térmico y oscilación temperaturas. Verano. ....	86
Tabla 15: Predicción de temperaturas utilizando AccuRate Program .....	88
Tabla 16: Escala valoración PMV según ISO 7730: 1994 .....	99
Tabla 17: Valores aconsejados parámetros PMV según ISO 7730: 1994.....	99
Tabla 18: Categorías de ambiente térmico. Índices PMV y PPD (INSHT, 2007) .....	101
Tabla 19: Factores que determinan el confort térmico (Szokolay, 2004) .....	105
Tabla 20: Valores de Rse y Rsi según DA-DB-HE1 del CTE .....	112
Tabla 21: Resistencias térmicas de cámaras de aire sin ventilar según DA-DB-HE1 del CTE.....	112
Tabla 22: Clasificación de una edificación según su "masa específica" o factor "f" de CIBSE (Szokolay, 2004) .....	117
Tabla 23: Valor base y factor corrector por superficie del consumo energético. ....	119
Tabla 24: Eficiencia de los sistemas.....	120
Tabla 25: Valor base y factor corrector por superficie de la demanda energética de calefacción. ....	121
Tabla 26: Transmitancia térmica máxima y permeabilidad al aire de los elementos de la envolvente térmica. ....	122



Tabla 27: Calendario de tareas del experimento (elaboración propia).....	125
Tabla 28: Descripción PINs sensor DALLAS DS18B20 (elaboración propia) .....	134
Tabla 29: Características técnicas sensor DALLAS DS18B20( <a href="http://www.RS-online.com">www.RS-online.com</a> ).....	135
Tabla 30: Características técnicas sensor DHT22 (elaboración propia) .....	140
Tabla 31: Descripción PINs sensor DHT22 (elaboración propia).....	141
Tabla 32: Cuadro superficies y usos CS (elaboración propia) .....	175
Tabla 33: Calendario (elaboración propia).....	178
Tabla 34: Catálogo de elementos constructivos del CTE. Materiales artificiales o suelos tratados. ....	182
Tabla 35: Relación entre conductividad y densidad (Heathcote, 2011) .....	183
Tabla 36: Cálculo transmitancia cerramiento tapia e=70 cm (elaboración propia).....	184
Tabla 37: Zonas climáticas (Código Técnico de la Edificación) .....	184
Tabla 38: Transmitancia térmica máxima de cerramientos y particiones interiores de la envolvente térmica para la zona climática D1 (CTE DB HE 1) .....	185
Tabla 39: IO17. Temperaturas exteriores 11 y 13/8/2015.....	194
Tabla 40: IO17, IO21 e IO27. Temperaturas máximas, medias y mínimas (11/8/2015) .....	198
Tabla 41: IO6, IO19, IO13 e IO16 Temperaturas máximas, medias y mínimas (11/8/2015)....	199
Tabla 42: Valores estadísticos sensor IO21 e IO19 (elaboración propia) .....	202
Tabla 43: IO17, IO21 e IO27. Temperaturas máximas, medias y mínimas (11/8/2015) .....	204
Tabla 44: IO6, IO19, IO13 e IO16 Temperaturas máximas, medias y mínimas interiores(13/8/2015) .....	206
Tabla 45: Valores estadísticos sensor IO21 e IO19 (elaboración propia) .....	208
Tabla 46: Humedad máxima, media y mínima 11 y 13/8/2015. ....	210

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Radiación global incidente en el plano vertical de las fachadas monitorizadas. Período de invierno. ....	66
Gráfico 2: Temperaturas interiores. Período invierno. ....	67
Gráfico 3: Temperaturas exteriores. Período invierno. ....	67
Gráfico 4: Influencia de la radiación solar en el flujo térmico. CS1 período invierno. ....	67
Gráfico 5: Influencia de la radiación solar en el flujo térmico. CS2 período invierno. ....	68
Gráfico 6: Influencia de la radiación solar en el flujo térmico. CS3 período invierno. ....	68
Gráfico 7: Radiación global incidente en el plano vertical de las fachadas monitorizadas. Período de verano. ....	69
Gráfico 8: Temperaturas interiores. Período verano. ....	69

Gráfico 9: Temperaturas exteriores. Período verano.....	70
Gráfico 10: Influencia de la radiación solar en el flujo térmico. CS1 período verano.....	70
Gráfico 11: Influencia de la radiación solar en el flujo térmico. CS2 período verano.....	71
Gráfico 12: Valores obtenidos por las sondas de temperatura superficial situadas en las distintas caras del muro. (Cavero & Jové, 2013).....	74
Gráfico 13: Variación de la demanda para el muro BTC_lab (abajo) y fachada ligera (arriba). (Cavero & Jové, 2013) .....	76
Gráfico 14: Irradiancia solar total. ....	86
Gráfico 15: Gráfico variación temperaturas 14 y 15 Marzo 2007.....	86
Gráfico 16: Gráfico variación temperaturas 18 y 19 Enero 2007. ....	87
Gráfico 17: Variación temperaturas 20 y 22 Mayo 2007. ....	88
Gráfico 18: Gráfico de simulación con incremento del aislamiento norte. ....	89
Gráfico 19: Explicación visual del efecto de transmisión de la masa térmica. (Hall, 2008) .....	91
Gráfico 20: Porcentaje estimado de insatisfechos PPD según voto estimado PMV según ISO 7730: 1994.....	100
Gráfico 21: Diagrama bioclimático de Olgyay ( <a href="http://www.arquimatica.com">www.arquimatica.com</a> ).....	107
Gráfico 22: Tiempo de desfase y factor de decremento para un cerramiento sólido y homogéneo (Szokolay, 2004).....	114
Gráfico 23: Secuencia de temperaturas para un cerramiento masivo en clima cálido (Szokolay, 2004).....	115
Gráfico 24: Temperatura y humedad relativa IO21 (11/8/2015) (elaboración propia) .....	187
Gráfico 25: Temperatura y humedad relativa IO27 (11/8/2015) (elaboración propia) .....	187
Gráfico 26: Temperatura y humedad relativa IO17 (11/8/2015) (elaboración propia) .....	188
Gráfico 27: Temperatura y humedad relativa sensor IO19 (superficie interior h=2.20 m) (elaboración propia) .....	188
Gráfico 28: Temperatura y humedad relativa sensor IO13 (superficie interior h=1.20 m) (elaboración propia) .....	189
Gráfico 29: Temperatura y humedad relativa sensor IO16 (ambiente interior) (elaboración propia) .....	189
Gráfico 30: Temperatura y humedad relativa sensor IO6 (interior muro h=2.20 m) (elaboración propia) .....	190
Gráfico 31: Temperatura y humedad relativa sensor IO21 (exterior h=2.20 m) (elaboración propia) .....	191
Gráfico 32: Temperatura y humedad relativa sensor IO27 (exterior h=1.20 m) (elaboración propia) .....	191
Gráfico 33: Temperatura y humedad relativa sensor IO17 ( ambiente exterior) (elaboración propia) .....	192
Gráfico 34: Temperatura y humedad relativa IO19 (h=2.20 m interior) (elaboración propia) ....	192

Gráfico 35: Temperatura y humedad relativa IO13 (h=1.20 m, interior) (elaboración propia) ...	193
Gráfico 36: Temperatura y humedad relativa IO16 (ambiente interior) (elaboración propia).....	193
Gráfico 37: Temperatura y humedad relativa IO6 (h=2.20 m, interior muro) (elaboración propia) .....	194
Gráfico 38: Radiación solar (W/m2) 11/8/2015 (www.meteogalicia.es) .....	195
Gráfico 39: Temperatura IO17, IO27 e IO21 (11/8/2015) (elaboración propia) .....	198
Gráfico 40: Temperatura IO16,IO19 e IO6 (elaboración propia) .....	200
Gráfico 41: Desfase térmico 11/8/2015 (elaboración propia) .....	200
Gráfico 42: Radiación solar (W/m2) 13/8/2015 (www.meteogalicia.es) .....	202
Gráfico 43: Temperatura IO17, IO27 e IO21 (13/8/2015).....	205
Gráfico 44: Temperatura IO13, IO16,IO19 e IO6. ....	207
Gráfico 45: Desfase térmico 13/8/2015.....	207
Gráfico 46: Humedad relativa IO16 e IO17 (11/8/2015) (elaboración propia).....	211
Gráfico 47: Humedad IO13 e IO19 11/8/2015 (elaboración propia) .....	212
Gráfico 48: Humedad relativa IO6, IO19 e IO21 (11/8/2015) (elaboración propia) .....	213
Gráfico 49: Humedad relativa IO6, IO13 e IO16 (elaboración propia) .....	213
Gráfico 50: Humedad relativa IO16 e IO17 (13/8/2015) (elaboración propia).....	214
Gráfico 51: Humedad IO13 e IO19 (13/8/2015) (elaboración propia) .....	215
Gráfico 52: Humedad relativa IO6, IO19 e IO21 (13/8/2015) (elaboración propia) .....	216
Gráfico 53: Humedad relativa IO6, IO13 e IO19 (13/8/2015) (elaboración propia) .....	216
Gráfico 54: Temperaturas °C sensor 6fff (7-14/8/2015).....	223
Gráfico 55: Temperaturas °C y humedad relativa % sensor IO19 (7-14/8/2015) .....	224
Gráfico 56: Temperaturas °C sensor 2eff (7-14/8/2015) .....	225
Gráfico 57: Temperaturas °C sensor b7ff (7-14/8/2015) .....	226
Gráfico 58: Temperaturas °C sensor 7aff (7-14/8/2015) .....	227
Gráfico 59: Temperaturas °C sensor 61ff (7-14/8/2015) .....	228
Gráfico 60: Gráfico 59: Temperaturas °C sensor 221ff (7-14/8/2015).....	229
Gráfico 61: Temperaturas °C y humedad relativa % sensor IO13 (7-14/8/2015) .....	230
Gráfico 62: Temperaturas °C sensor f6ff (7-14/8/2015).....	231
Gráfico 63: Temperaturas °C sensor 1cff (7-14/8/2015).....	232
Gráfico 64: Temperaturas °C y humedad relativa % sensor IO21 (7-14/8/2015) .....	233
Gráfico 65: Temperaturas °C sensor c9ff (7-14/8/2015).....	234
Gráfico 66: Temperaturas °C sensor 75ff (7-14/8/2015) .....	235
Gráfico 67: Temperaturas °C sensor 13ff (7-14/8/2015) .....	236
Gráfico 68: Temperaturas °C sensor a6ff (7-14/8/2015) .....	237

Gráfico 69: Temperaturas °C sensor e0ff (7-14/8/2015) .....	238
Gráfico 70: Temperaturas °C y humedad relativa % sensor IO20 (7-14/8/2015) .....	239
Gráfico 71: Temperaturas °C y humedad relativa % sensor IO27 (7-14/8/2015) .....	240
Gráfico 72: Temperaturas °C sensor 76ff (7-14/8/2015) .....	241
Gráfico 73: Temperaturas °C y humedad relativa % sensor IO6 (7-14/8/2015) .....	242
Gráfico 74: Temperaturas °C y humedad relativa % sensor IO16 (7-14/8/2015) .....	243
Gráfico 75: Temperaturas °C y humedad relativa % sensor IO26 (7-14/8/2015) .....	244
. Gráfico 76: Temperaturas °C y humedad relativa % sensor IO17 (7-14/8/2015) .....	245

## ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1: III Xornadas Bioconstrucción: Con Terra. Aplicacións Construtivas. Organiza Espiga: Asociación Galega para a Bioconstrucción (elaboración propia) .....	45
Fotografía 2: III Xornadas Bioconstrucción: Con Terra. Aplicacións Construtivas. Organiza Espiga: Asociación Galega para a Bioconstrucción (elaboración propia) .....	46
Fotografía 3: III Xornadas Bioconstrucción: Con Terra. Aplicacións Construtivas. Organiza Espiga: Asociación Galega para a Bioconstrucción (elaboración propia) .....	46
Fotografía 4: Capilla de la Reconciliación. Berlín ( <a href="http://www.mundoflaneur.com">www.mundoflaneur.com</a> ).....	47
Fotografía 5: Bodega en Lanciego (A.P.Arquitecturas S.L.) .....	48
Fotografía 6: "Back 40" House, Tucson, Arizona (Gatti, 2012) .....	49
Fotografía 7: Eden Project ( <a href="http://www.rammedearthconsulting.com">www.rammedearthconsulting.com</a> ) .....	50
Fotografía 8: Vista exterior del muro de tapia (Arquitecturas de Tapia).....	51
Fotografía 9: Piscina municipal de Toro, Zamora, España. ( <a href="http://blogs.elpais.com">blogs.elpais.com</a> ).....	51
Fotografía 10: Escuela Infantil Eulàlia de Ronçana, Barcelona ( <a href="http://www.construccion21.org">www.construccion21.org</a> ) .....	52
Fotografía 11: Escuela Deepanam , Auroville ( <a href="http://www.earth-auroville.com">www.earth-auroville.com</a> ).....	53
Fotografía 12: Centro de formación del Instituto de la Tierra , Auroville ( <a href="http://www.earth-auroville.com">www.earth-auroville.com</a> ) .....	53
Fotografía 13: Hall del Bodhi Mandala Zen Center, Jemez Springs, Nuevo México (Nicholas Larranaga-Couty).....	54
Fotografía 14: Oficinas imprenta Gugler Print&Media .....	55
Fotografía 15: Vista del montaje del prototipo S-low 1 (Estévez & Martín-Lara, 2013) .....	57
Fotografía 16: Vista del montaje del prototipo S-low 2 (Estévez & Martín-Lara, 2013) .....	57
Fotografía 17: Vista del montaje del prototipo S-low 3 (Estévez & Martín-Lara, 2013) .....	58
Fotografía 18: Pared calefactada de tapial sala de conciertos en la Kapitelplatz, Salzburg, Austria (Mag & Rauch, 2011) .....	59
Fotografía 19: Fachada monitorizada CS1.....	63

Fotografía 20: Fachada monitorizada CS2.....	64
Fotografía 21: Fachada monitorizada CS3.....	65
Fotografía 22: Raspberry Pi 2 Modelo B (elaboración propia) .....	126
Fotografía 23: Web de la Fundación Raspberry Pi. ....	127
Fotografía 24: Tarjeta micro SDCH 16 Gb Class 4 con adaptador SD y Cable HDMI 1.4 macho a macho 2.00 m (elaboración propia) .....	127
Fotografía 25: Fuente de alimentación micro USB 5V DC 2.1 A y teclado (www.cetronic.es) ..	128
Fotografía 26: Instalación de los disipadores (elaboración propia) .....	128
Fotografía 27: Conexión de la Raspberry Pi 2 (elaboración propia) .....	129
Fotografía 28: Pantalla arranque RPI2. (elaboración propia) .....	129
Fotografía 29: Pantalla configuración SO en RPI2 (elaboración propia) .....	130
Fotografía 30: Opciones de configuración SO Raspbian (elaboración propia) .....	131
Fotografía 31: Fin configuración SO. Reinicio del RPI 2 (elaboración propia).....	131
Fotografía 32: : DS18B20 y resistencia pull-up de 4.7 Kohm (elaboración propia) .....	134
Fotografía 33: Sensor DS18B20 encapsulado (elaboración propia).....	135
Fotografía 34: Placa protoboard 150*50 mm (elaboración propia).....	136
Fotografía 35: Cobbler Breakout, (www.cetronic.es) .....	136
Fotografía 36: Jumpers de conexión (www.cetronic.es) .....	137
Fotografía 37: Sensores DS18B20 conectado en bus a placa protoboard (elaboración propia) .....	137
Fotografía 38: Identificación sensores DS18B20 en RPI2 (elaboración propia) .....	138
Fotografía 39: Lectura sensor DS18B20 en RPI2 (elaboración propia) .....	138
Fotografía 40: Sensor humedad y temperatura DHT22 (elaboración propia) .....	140
Fotografía 41: Conexión DHT22 en protobase (elaboración propia) .....	142
Fotografía 42: Ejecución script para sensor DHT22 (elaboración propia) .....	145
Fotografía 43: Resistencia 4.7 y 10 Koh, estaño y polímetro (www.cetronic.es y elaboración propia) .....	147
Fotografía 44: Tenaza pelacables, soldador eléctrico de 40 W y cable data YCY 4*0.22 mm (www.cetronic.es) .....	147
Fotografía 45: Taladro, cinta aislante y bridas reutilizables (elaboración propia).....	147
Fotografía 46: Laca acrílica protectora y aislante y jumpers conexión protoboard machos (www.cetronic.es) .....	148
Fotografía 47: Área interior de instalación de los sensores (elaboración propia).....	148
Fotografía 48: Área interior de instalación de los sensores (elaboración propia).....	149
Fotografía 49: Cerramiento monitorizado. Vista exterior ( elaboración propia ) .....	149
Fotografía 50: Identificación sensores DS18B20 (elaboración propia).....	150

Fotografía 51: Etiquetado sensores DALLAS DS18b20 (elaboración propia) .....	150
Fotografía 52: Sensores DALLAS DS18b20 identificados y etiquetados (elaboración propia) .....	151
Fotografía 53: Conexionado sensores DS18b20 placa protoboard (elaboración propia) .....	151
Fotografía 54: Prueba de funcionamiento de los sensores DALLAS DS18b20 (elaboración propia) .....	152
Fotografía 55: Sensores DHT22 identificados y etiquetados (elaboración propia) .....	152
Fotografía 56: Conexión DHT22 en placa protoboard (elaboración propia).....	153
Fotografía 57: Verificación del funcionamiento de los sensores DHT22 (elaboración propia) ...	153
Fotografía 58: Verificación del funcionamiento de los sensores DHT22 (elaboración propia) ..	154
Fotografía 59: Soldado de resistencias en sensor DHT22 (1) (elaboración propia) .....	154
Fotografía 60: Soldado de resistencias en sensor DHT22 (2) (elaboración propia) .....	155
Fotografía 61: Instalación sensor DHT22 en el interior del cerramiento (1) (elaboración propia) .....	155
Fotografía 62: Instalación sensor DHT22 en el interior del cerramiento (2) (elaboración propia) .....	156
Fotografía 63: Instalación sensor DHT22 en el interior del cerramiento (3) (elaboración propia) .....	156
Fotografía 64: Instalación sensor DHT22 en el interior del cerramiento (4) (elaboración propia) .....	157
Fotografía 65: Instalación sensor DHT22 en el interior del cerramiento (4) (elaboración propia) .....	157
Fotografía 66: Conexionado e instalación DS18b20 superficie interior (1) (elaboración propia) .....	158
Fotografía 67: Conexionado e instalación DS18b20 superficie interior (2) (elaboración propia) .....	158
Fotografía 68: Proceso instalación interior sensores (elaboración propia).....	159
Fotografía 69: Protección de los pines de los sensores con laca acrílica aislante (elaboración propia) .....	159
Fotografía 70: Unión cables de alimentación sensores instalación interior (elaboración propia) .....	160
Fotografía 71: Conexionado de cables de alimentación sensores instalación interior a ficha (elaboración propia) .....	160
Fotografía 72: Unión cables de conexión a tierra sensores instalación interior (elaboración propia) .....	161
Fotografía 73: Ajuste de ficha en cableado instalación interior (elaboración propia).....	161
Fotografía 74: Conexionado sensores interiores a ficha (elaboración propia).....	162
Fotografía 75: Resultado final instalación interior de sensores (elaboración propia) .....	162
Fotografía 76: Conexionado de instalación interior a placa protoboard (elaboración propia) ...	163

Fotografía 77: Puesta en funcionamiento sensores DS18b20 instalación interior (elaboración propia) .....	163
Fotografía 78: Puesta en funcionamiento sensores DHT22 instalación interior (elaboración propia) .....	163
Fotografía 79: Fachada exterior objeto de estudio (elaboración propia) .....	164
Fotografía 80: Identificación y etiquetado DS18b20 encapsulado (elaboración propia) .....	164
Fotografía 81: Prueba de funcionamiento DS18b20 encapsulado (elaboración propia) .....	165
Fotografía 82: Identificación y etiquetado cableado instalación exterior (1) (elaboración propia) .....	165
Fotografía 83: Identificación y etiquetado cableado instalación exterior (2) (elaboración propia) .....	166
Fotografía 84: Identificación y etiquetado sensor DS18b20 exterior (elaboración propia) .....	166
Fotografía 85: Preparación final sensor DHT22 exterior (elaboración propia) .....	167
Fotografía 86: Unificación cableado instalación exterior (elaboración propia) .....	167
Fotografía 87: Soldado cableado instalación exterior (1) (elaboración propia) .....	168
Fotografía 88: Soldado cableado instalación exterior (2) (elaboración propia) .....	168
Fotografía 89: Soldado cableado instalación exterior (3) (elaboración propia) .....	169
Fotografía 90: Prueba de funcionamiento sensores DS18b20 de la instalación interior y exterior (elaboración propia) .....	169
Fotografía 91: Instalación exterior (elaboración propia) .....	170
Fotografía 92: Prueba final de funcionamiento de toda la instalación de sensores (elaboración propia) .....	171
Fotografía 93: Registro datos sensor DHT22 (elaboración propia) .....	172
Fotografía 94: Filtrado datos sensor DHT22 (elaboración propia) .....	172
Fotografía 95: Localización caso estudio ( <a href="http://www.google.es/maps">www.google.es/maps</a> ) .....	175
Fotografía 96: Fachada principal vivienda objeto estudio (elaboración propia) .....	176
Fotografía 97: Fachada trasera vivienda objeto estudio (elaboración propia) .....	176
Fotografía 98: Estación Marroxo ( <a href="http://www.meteogalicia.es">www.meteogalicia.es</a> ) .....	181
Fotografía 99: Ubicación sensor IO17 (ambiente exterior) (elaboración propia) .....	195
Fotografía 100: Posicionamiento sensor IO17 (ambiente exterior) (elaboración propia) .....	196





## INTRODUCCIÓN

La monitorización de todo tipo de viviendas y construcciones permite obtener datos del comportamiento en tiempo real y la evolución de una instalación o sistema constructivo en funcionamiento. Posibilita la obtención de gráficas para el análisis y optimización su comportamiento así como una alta eficiencia energética si se consigue que los diferentes sistemas e instalaciones del edificio interactúen entre sí, pudiendo alcanzar el objetivo de edificios de “consumo cero”.

El presente trabajo pretende remarcar la necesidad de un estudio pormenorizado de las características de los cerramientos para conseguir un funcionamiento eficiente del edificio. Se centra en el estudio de un cerramiento de tierra apisonada o tapia, y más concretamente en su capacidad almacenadora de calor y confort térmico. Se desarrolla una metodología de análisis energético mediante sensores, orientado a la investigación del funcionamiento de un muro de tapia expuesto a radiación solar en período de verano.

La obtención de estos datos numéricos y experimentales permite alcanzar un nivel de comprensión más claro acerca del funcionamiento de un muro de tapia, además de alcanzar conclusiones sobre la influencia de la radiación sobre el material.

El presente trabajo aporta las siguientes características:

1. Consiste en un método de ensayo no destructivo.

La metodología de análisis mediante sensores, aunque todavía en fase de desarrollo, es ampliamente acogida ya que aporta información sobre situaciones reales e "in situ", Esta metodología se hace indispensable para el estudio de edificios ya construidos.

2. Como una herramienta imprescindible para el análisis del comportamiento bioclimático de las fachadas en general.
3. Como nueva metodología para el análisis, peritaje e intervención en edificios ya construidos.

El calentamiento global ha propiciado la necesidad de reducir las emisiones de dióxido de carbono. Como respuesta, a esta necesidad, el gusto por materiales de construcción como la tierra, ha sufrido un auge debido a su buen comportamiento térmico además de su baja energía incorporada.

El futuro de la construcción con tierra pasa por el establecimiento de una normativa además de los controles de calidad para el material y el proceso de ejecución que permitan incorporar a la tierra dentro de la práctica constructiva habitual.

En el presente estudio, se selecciona el Municipio de Monforte de Lemos por los siguientes motivos:

1. Por el numeroso patrimonio construido en tapia existente en la localidad y poner el foco de atención en la escasa valoración y conservación del mismo tanto por parte de las autoridades como de los vecinos
2. Por el interés de satisfacer la curiosidad sobre la técnica desde el punto de vista de la bioconstrucción y su funcionamiento como material capacitivo
3. Con el fin de obtener datos acerca de la capacidad del hombre para crear habitabilidad en lugares concretos, con climas concretos y sociedades concretas.



## CAPÍTULO 1: ESTADO DE LA CUESTIÓN

### 1.1. EL SISTEMA CONSTRUCTIVO.

#### 1.1.1. Origen

##### 1.1.1.1. Mesopotamia

El origen de la construcción con tierra se remonta al Neolítico (6000 - 3000 a.C.) momento en el cual se producen el acontecimiento que cambian completamente la vida del hombre: la revolución agrícola, que lo transforma de nómada a sedentario, facilitando así la aparición del poblado.

Es en Mesopotamia, zona situada entre los ríos Tigris y Éufrates, en torno al 5000 a.C., donde aparecen las primeras manifestaciones. A pesar de ello, la arqueología apenas ha podido recuperar restos arquitectónicos en la arquitectura popular, no siendo así en la monumental.

Estas primeras construcciones eran de adobes recubierto con alabastro o cerámica vidriada.

*"Construían con arco y bóveda, por lo que la columna apenas tiene importancia. El edificio más importante era el palacio, de enormes proporciones y muchas dependencias, y que englobaba al templo en la mayoría de los casos".*

(Ruitort, 1987)

Dentro de la arquitectura monumental mesopotámica destacan:



Ilustración 1: Palacio de Tell Brak ([www.historiaantigua.es](http://www.historiaantigua.es))

El Palacio de Tell Brak (Siria). Data de la segunda mitad del tercer milenio a.C. Fue construido con muros de 10 m de espesor.



Ilustración 2: Palacio de Mari ([www.nationalgeographic.com](http://www.nationalgeographic.com))

El Palacio de Mari data de la primera mitad del segundo milenio a.C. Su planta se organiza en torno a dos grandes patios, con una sola entrada

El Palacio de Asumnasirpal (S.IX a.C.) se ubica en la localidad asiria de Nimrud el cual, lamentablemente ha sido en parte destruido el pasado mes de marzo por milicianos del Ejército Islámico (EuropaPress, 2015)

El Palacio de Sargón II en Dur-Sharrukin (Korsabad) del S. VIII a.C. Se ubicaba en la actual provincia de Nínive, y al igual que en el caso anterior ha sido recientemente destruido por el EI<sup>1</sup> (EFE, 2015)



Ilustración 3: «Los Jardines Colgantes de Babilonia», Martin Heemskerck

Palacio de Babilonia, reconstruido por Nabucodonosor y en el que se cree se encontraban los famosos jardines colgantes.

---

<sup>1</sup> El: Ejército Islámico.

#### 1.1.1.2. La Civilización del Indo (3000 a.c. - 5000 a.c.)

Desarrollada en el noroeste de la India en el valle aluvial del mismo nombre. Destacan las ciudades de Harrappa y Mohenjodaro, ahora gigantescas ruinas que dejan evidencia de un desarrollo relativamente avanzado de las dos ciudades. Fueron cuidadosamente planeadas, con agua corriente y saneamiento. Los edificios estaban contruidos a base de ladrillo cocido y barro.

#### 1.1.1.3. Orígenes de la edificación con tierra apisonada en España.

En España, la edificación con tierra cruda se remonta a la Edad de Bronce (año 3000 a.C.) cuando surge la cultura del Argar en Almería. Esta cultura situaban sus poblados en zonas elevadas y protegidas. Las edificaciones eran de planta rectangular o trapezoidal, y construían con piedra, adobes y muros de tapia.

Plinio el Viejo (29-79 d.C.) en el libro III, capítulo III, de su Historia Natural, hace referencia a las antiguas torres y casas hechas con tierra de la Península Ibérica. Habla de "muros apisonados más que contruidos"

Aunque el impulso definitivo y perfeccionamiento de la técnica se consiguió con los árabes.

### 1.1.2. Materiales

#### 1.1.2.1. Suelo y/o tierra

Se entiende por suelo a todo material de la corteza terrestre resultante de la descomposición de rocas, constituido por elementos minerales y/o orgánicos, que dependen de la composición química y mineralógica de la roca de origen, de las características del relieve, de los diferentes climas y del tiempo de exposición a las intemperies.

Suelo es el término empleado en el campo de la ingeniería mientras que, cuando se refiere a construcción con tierra el término que pasa a adoptarse es tierra cruda, tierra sin cocer, tierra para construir pero, lo usual y adoptado en este trabajo, es el término tierra (Neves, Faria, Rotondaro, Cevallos, & Hoffmann, 2009) Las cualidades de sostenibilidad de la tierra son:

1. Fuente de abastecimiento ilimitada.
2. Reducción de los residuos y los gastos de transporte del material al poder utilizar las tierras procedentes de las propias excavaciones.
3. Reducción del impacto ambiental durante el transporte.
4. Reducción del impacto paisajístico de las obras al ser el emplazamiento, en la mayoría de los casos, en lugar de extracción.
5. Procesos de producción sencillos, por lo que el consumo energético asociado es mínimo.
6. No produce emisiones tóxicas durante su transformación y vida útil.
7. Bajo consumo de agua durante la obra ya que en el caso del tapial y BTC la tierra se trabaja con una humedad en torno al 10%.
8. Durante la fase de demolición, el material no precisa de ningún tratamiento especial para ser devuelto al medio ambiente. Incluso en el caso de tierras estabilizadas con

cemento o cal, el porcentaje del estabilizante es tan reducido (5-10%) que no supone riesgo para el entorno.

9. La tierra como material se considera prácticamente incombustible, no propaga el fuego y no emite gases tóxicos. La resistencia al fuego de los muros de tierra se debe considerar de REI 90 para espesores iguales o mayores a 150 mm, con lo que es equivalente a la resistencia de otros materiales convencionales.

#### 10. Emisiones de CO<sub>2</sub>

Material	Densidad	Emisiones por kg	Emisiones por m <sup>3</sup>
Tapial sin estabilizar	2200 kg/m <sup>3</sup>	0,004 kg CO <sub>2</sub> /kg	9,7 kg CO <sub>2</sub> / m <sup>3</sup>
Adobe	1200 kg/m <sup>3</sup>	0,06 kg CO <sub>2</sub> /kg	74 kg CO <sub>2</sub> / m <sup>3</sup>
Hormigón en masa in situ	2360 kg/m <sup>3</sup>	0,14 kg CO <sub>2</sub> /kg	320 kg CO <sub>2</sub> / m <sup>3</sup>
Hormigón prefabricado (2% acero)	2500 kg/m <sup>3</sup>	0,18 kg CO <sub>2</sub> /kg	455 kg CO <sub>2</sub> / m <sup>3</sup>
Pared de ladrillo macizo	1600 kg/m <sup>3</sup>	0,19 kg CO <sub>2</sub> /kg	301 kg CO <sub>2</sub> / m <sup>3</sup>
Pared de ladrillo hueco	670 kg/m <sup>3</sup>	0,14 kg CO <sub>2</sub> /kg	95 kg CO <sub>2</sub> / m <sup>3</sup>

Tabla 1: Emisiones de CO<sub>2</sub> (Bestraten & Hormías, 2011)

#### 1.1.2.2. Normativa existente

La normativa española, no ha incluido las técnicas de construcción con tierra en la mayoría de los casos, a excepción del Piet-70 (Instituto Eduardo Torroja, 1971). En las "Prescripciones sobre Obras de Fábrica" incluye las propiedades que debe tener la tierra empleada para la fabricación de adobes y muros de tapia. Relaciona de manera orientativa los porcentajes de cada componente (arcilla, limos, arenas y gravas) y establece en función de los mismos la clasificación de los diferentes tipos de tapia:

- A. Tapia de barro: aquella a la que se le añade paja a la tierra.
- B. Tapia de tierra consolidada: de granulometría más cuidada.

Arcilla	10 - 40 %
Limos	20 - 40 %
Arenas	10 - 40 %
Gravas	10 - 20 %

El contenido de limo y arcilla debe ser inferior al 45 % del total.

C. Tapia estabilizada.

Arcilla + limo	$\leq 30 \%$
Arenas	$\geq 33 \%$

IP = 6 - 22 %, LL < 40 % y LP = 12 - 20 %

En la actualidad en España:

1. La UNE-41410:2008. Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo publicada en el año 2010.
2. Las UNEs para adobe y tapial se encuentran actualmente en proceso de redacción.
3. En cuanto al Código Técnico de la Edificación (de aquí en adelante CTE), Algorri (2009) lo define como un documento prestacional, es decir, marca unos objetivos, pero permite cierta libertad para la consecución de los mismos al permitir que el proyectista, bajo su responsabilidad y previa conformidad del promotor, adopte soluciones alternativas.
4. A través del Ministerio de la Vivienda y el Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja se está elaborando un documento como guía para el cumplimiento del Código Técnico de la Edificación en los edificios de tierra (Algorri, 2009).
5. En lo que a la caracterización de tierras se refiere, AENOR<sup>2</sup> establece una serie de normativas, que si bien por sí mismas no son de carácter obligatorio, establecen procedimientos de ensayo, así:
  - 5.1. UNE-EN ISO 14688-1:2003. Ingeniería geotécnica. Identificación y clasificación de suelos. Parte 1: Identificación y descripción. (ISO 14688-1: 2002)
  - 5.2. UNE 103101:1995. Análisis granulométrico de suelos por tamizado.
  - 5.3. UNE 103102:1995. Análisis granulométrico de suelos finos por sedimentación. Método del densímetro.
  - 5.4. UNE 103103:1994. Determinación del límite líquido de un suelo por el método del aparato de Casagrande

---

<sup>2</sup>AENOR: Asociación Española de Normalización y Certificación es una entidad privada sin fines lucrativos que se creó en 1986. Su actividad contribuye a mejorar la calidad y competitividad de las empresas, sus productos y servicios.

- 5.5. UNE 103104:1993. Determinación del límite plástico de un suelo.
- 5.6. UNE 7050-2:1997. Tamices y tamizado de ensayo. Parte 2: Telas metálicas, chapas perforadas y láminas electroformadas. Medidas nominales de las aberturas.
- 5.7. UNE 103501:1994. Ensayo Próctor modificado.
- 5.8. NTL 305:90. Rotura de probetas a compresión simple.

Países como Alemania con tradición "autoconstructora" han hecho que este material no cayese en desuso. Así, ya en el año 1951 incluyeron en sus normas DIN directrices para la construcción con tierra, aunque fueron suprimidas tras el crecimiento económico posterior.

### 1.1.2.3. Pruebas experimentales para la caracterización de tierras. Ensayos en laboratorio.

Según la norma "UNE-41410:2008: Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo", y extrapolando el contenido de la misma a la ejecución de muros de tapia debido a la semejanza de dichos elementos entre sí, la tierra destinada a la construcción de BTC<sup>3</sup> se compone de grava, arena, limo y arcillas además de agua pudiendo ser opcionalmente estabilizada y aditivada.

La norma UNE-EN ISO 14688-1:2003<sup>4</sup> clasifica los componentes de un suelo en función del tamaño máximo de sus partículas:

Fracciones de suelo	Subdivisiones	Símbolos	Tamaños de partículas mm
Suelos muy gruesos	Grandes piedras	LBo	> 630
	Piedras	Bo	> 200 a 630
	Guijarros	Co	> 63 a 200
Suelos gruesos	Grava	Gr	> 2.0 a 63
	Grava gruesa	CGr	> 20 a 63
	Grava media	MGr	> 6.3 a 20
	Grava fina	FGr	> 2.0 a 6.3
	Arena	Sa	> 0.063 a 2.0
	Arena gruesa	CSa	> 0.63 a 2.0
	Arena media	MSa	> 2.0 a 6.3
	Arena fina	FSa	> 0.063 a 0.2

<sup>3</sup>BTC: Bloques de tierra comprimida

<sup>4</sup>UNE-EN ISO 14688-1:2003. Ingeniería geotécnica. Identificación y clasificación de suelos. Parte 1: Identificación y descripción. (ISO 14688-1: 2002)



Suelos finos	Limos	Si	> 0.002 a 0.063
	Limos gruesos	CSi	> 0.02 a 0.063
	Limos medios	MSi	> 0.006 a 0.02
	Limos finos	FSi	> 0.002 a 0.0063
	Arcillas	Cl	≤ 0.002

Tabla 2: Clasificación de los componentes de un suelo en función del tamaño máximo de sus partículas (**UNE-EN ISO 14688-1:2003**)

Generalmente, las gravas son pequeños fragmentos de rocas como areniscas, calizas y cuarcitas y las arenas y partículas finas son elementos minerales aislados como feldespatos, minerales arcillosos, micas o cuarzo.

Según el porcentaje de cada uno de los citados elementos, se definen los distintos tipos de suelo y en consecuencia las diferentes propiedades físicas y mecánicas de los mismos.

Fermín Font y Pere Hidalgo, en el libro titulado *Arquitecturas de Tapia*, establecen como parámetros determinantes para el conocimiento exhaustivo de una tierra su granulometría<sup>5</sup> y las características plásticas de la arcilla, es decir, su límite líquido (LL), límite plástico (LP) e índice de plasticidad (IP).

## GRANULOMETRÍA

Para determinar la granulometría de un suelo se extiende una muestra del mismo sobre una superficie plana y se compara con un patrón granulométrico. Debido a que las arcillas<sup>6</sup> y limos<sup>7</sup> no son comparables debido a su reducido tamaño, la norma UNE-EN ISO 14688-1:2003 nos refiere a otros métodos como:

- Determinación del contenido de finos mediante lavado de una muestra para separar la parte fina y posteriormente describir el residuo grueso.
- Determinación de la resistencia en seco, en función de la cual lo se clasifica en limos o arcillas. Una resistencia en seco baja es característica de los limos mientras que una resistencia en seco alta caracteriza a las arcillas.
- Determinación de la dilatancia. Para ello se amasa una pequeña cantidad de suelo (10-20 mm) humedecido entre las manos. La muestra se vuelve brillante por la aparición de agua en la superficie de la misma. En el momento que es presionada, el agua desaparece. Según el tiempo que tarde el agua en desaparecer se clasificará como limo o arcilla.

<sup>5</sup>Granulometría: medición del tamaño de las partículas de un suelo y su distribución.

<sup>6</sup>Los suelos arcillosos son de tacto jabonoso y pegajoso. Es difícil eliminarlos de las manos incluso cuando están secos.

<sup>7</sup>Los suelos con alto contenido en limos son suaves al tacto, y una vez secos pueden eliminarse fácilmente soplando.

- D. Para determinar el contenido de arena, limo y arcilla la misma normativa establece como metodología el frotar una pequeña muestra entre los dedos, añadiendo agua si fuese necesario.
- a. La fracción de arena se puede determinar a partir del grado en el que el material se aprecie arenoso al tacto.
  - b. Para determinar la presencia de limos o arcillas, se corta una muestra del terreno en estado natural. Si se aprecia una superficie brillante al corte, el suelo manifiesta la presencia de arcillas. Sin embargo, si la superficie de corte es mate, el suelo contiene limos o se trata de un limo-arenoso-arcilloso de baja plasticidad.

### Análisis granulométrico de los suelos por tamizado según une 103101:1995

La norma UNE 103101:1995 clasifica las diferentes partículas de suelo por tamaño, empleando para ello una serie de tamices y reflejando dichas cantidades ellos en %.

Materiales necesarios para la realización del ensayo:

- A. Una serie de tamices de alambre y malla cuadrada según UNE 7050-2:19978
- B. Dos balanzas: la primera con capacidad para 1 Kg y precisión de 1g. La segunda de una capacidad de 200 g y precisión de 0.01 g.
- C. Un agitador cuyo motor pueda alcanzar las 10000 r.p.m sin carga. El agitador dispondrá de una varilla una paleta o hélice reemplazable.
- D. Secadores (circulación de aire caliente y frío) regulables hasta los 60 °C.
- E. Estufa de desecación con temperatura regulable hasta los 115 °C.
- F. Mortero con la parte inferior de goma y manilla del mismo material.
- G. Vaso de precipitados de 600 ml.
- H. Cepillo y brocha.
- I. Agua destilada.

Una vez preparada la muestra según norma, se tamiza por el 20 mm para lo que puede ser necesario el lavado, en cuyo caso la parte retenida se secará en estufa hasta masa constante. Una vez fría, se tamiza por la serie de tamices de malla superior a 20 mm, anotando la masa retenida en cada uno de ellos con precisión de 1 g en el impreso del ANEXO A de la citada norma.

De la fracción que atraviesa el tamiz 20 mm se separa por cuarteo una muestra de unos 2 kg, se pesa y se anota en la columna C del formulario (si la muestra fuese próxima a los dos kilos no es necesario el cuarteo).

Esta porción se tamiza nuevamente por el 2 mm, obteniendo así dos fracciones. La fracción retenida se lava, recogiendo todo el material que pasa por él para posteriormente decantarlo, desecarlo en estufa, enfriarlo y agregarlo a la fracción que pasa por dicho tamiz. La fracción retenida se deseca en estufa, se enfría y se tamiza por la serie elegida entre 20 mm y 2 mm. Se determina la masa de la porción retenida en cada una de ellos y se anota en el formulario.

---

<sup>8</sup>UNE 7050-2:1997 Tamices y tamizado de ensayo. Parte 2: Telas metálicas, chapas perforadas y láminas electroformadas. Medidas nominales de las aberturas.

La fracción inferior a los 2 mm se cuarteas:

- A. Si se trata de suelos arenosos en dos porciones de unos 150 g.
- B. Si son suelos arcillosos o limosos, en dos porciones de unos 80 g.

De una de las porciones se extrae 20 g (con precisión de 0.01 g) y se determina la humedad higroscópica<sup>9</sup>. De la otra porción se toma 100 g (si se trata de suelo arenoso) o 50 g (si se trata de un suelo arcillosos o limosos) determinando igualmente con precisión de 0.01 g su masa y anotándola en el formulario.

Se depositan las muestras a un vaso de precipitados al que se añade al mismo tiempo que se agita con la varilla unos 125 cm<sup>3</sup> de solución de hexametáfosfato sódico al 4% y se deja en reposo 18 h. A continuación se sitúa la suspensión al vaso de agitación. Se añade agua destilada hasta estar aproximadamente a unos 5 cm del borde y se agita durante no menos de 1 min a 10000 r.p.m.

Si únicamente se realiza el análisis granulométrico por tamizado, se verterá esta solución por el tamiz 0.080 mm para el posterior traslado y secado en bandeja. Una vez frío, se tamiza por la serie elegida entre los 2 mm y 0.080 mm. Nuevamente se determina la masa retenida en cada tamiz con una precisión de 0.01 g y se anotan dichos valores en el formulario.

La obtención de resultados se obtendrán en función de los formularios incluidos en los anexos de la normativa de referencia.

#### Análisis granulométrico de suelos finos por sedimentación: método del densímetro.

Se utiliza para determinar cuantitativamente la distribución de las partículas de un suelo desde los 80 µm a 2 µm. El procedimiento de ensayo se describe en la norma UNE 103102:1995<sup>10</sup> Análisis granulométrico de suelos finos por sedimentación. Método del densímetro.

#### PLASTICIDAD: LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD.

El límite líquido<sup>11</sup> o LL se determina según la norma UNE 103103:1994<sup>12</sup>.

Materiales necesarios para el ensayo:

- A. Cuchara de Casagrande. Consiste en un dispositivo controlado para su caída sobre una base dura, fabricada con aleación de cobre atendiendo a la norma UNE-EN 1982:2009<sup>13</sup>.
- B. Acanalador normalizado.
- C. Espátulas de hojas flexibles.

<sup>9</sup>Humedad higroscópica: es la humedad que alcanza esa porción de suelo en equilibrio con la atmósfera del laboratorio.

<sup>10</sup>UNE 103102:1995 Análisis granulométrico de suelos finos por sedimentación. Método del densímetro.

<sup>11</sup>Límite líquido o LL: A efecto de la norma UNE 103103:1994, se entiende por límite líquido la humedad que tiene un suelo amasado con agua y colocado en una cuchara normalizada, cuando un surco, realizado con un acanalador normalizado, que divide dicho suelo en dos mitades, se cierra a lo largo de su fondo en una distancia de 13 mm, tras haber dejado caer 25 veces la mencionada cuchara desde una altura de 10 mm sobre una base también normalizada, con una cadencia de dos golpes por segundo.

<sup>12</sup>UNE 103103:1994 Determinación del límite líquido de un suelo por el método del aparato de Casagrande

<sup>13</sup>UNE-EN 1982:2009 Cobre y aleaciones de cobre. Lingotes y piezas fundidas.

- D. Pesasustancias con tapa.
- E. Balanza de 100 gr como mínimo y precisión de 0.01 g.
- F. Tamiz de 400  $\mu\text{m}$ .
- G. Una superficie lisa, como por ejemplo un vidrio.
- H. Estufa de desecación de temperatura regulable hasta 115 °C.
- I. Mortero con mazo de goma o molino.
- J. Cámara húmeda que mantenga una humedad relativa de 95%  $\pm$  5% y una temperatura de 20 °C  $\pm$  3 °C, calibre.
- K. Pinzas, frasco lavador y agua destilada.

A grandes rasgos, el procedimiento operatorio<sup>14</sup> es como sigue:

Previamente a la ejecución del experimento, se comprueba el buen estado de conservación de la cuchara y acanalador, así como el ajuste de la altura de caída de la cuchara. Una vez preparada la muestra, se separa la cuchara del resto del aparato y se coloca en la misma una porción de suelo amasado, procurando formar una superficie lisa de al menos 10 mm de espesor en su parte más profunda. Se debe cuidar que no queden burbujas en el interior de la misma. A continuación se hace un surco con el acanalador de arriba hacia abajo, con el borde biselado hacia adelante y con el acanalador en todo momento perpendicular a la superficie de la cuchara y describiendo un arco.

Una vez realizado el surco, se coloca la cuchara nuevamente en el aparato, comprobando que no queden restos en la cara inferior de la misma y se gira la manivela a razón de dos vueltas por segundo y se cuenta el número de golpes necesarios para que se cierre el surco en una distancia de 13 mm.

- A. Si el número de golpes está comprendido entre 15 y 35, se toma una porción de suelo de entre 10 y 15 gr de la zona próxima al surco y se clasifica según su contenido de humedad atendiendo a la norma UNE 103300:1993<sup>15</sup>
- B. Si el número de golpes no está comprendido entre 15 y 35, la determinación no es válida. Entonces, se repite el ensayo hasta conseguir una determinación entre 15 y 25 golpes y otra entre 25 y 35, considerando que el número de golpes disminuye al aumentar el agua destilada añadida durante el amasado.

Si tras varias determinaciones, el número de golpes nunca fuese inferior a 25 significa que no se puede determinar el límite líquido de la muestra y se valida el suelo como no plástico, prescindiendo así de la determinación por ensayo de dicho límite.

Para la obtención de resultados, se trasladan las determinaciones obtenidas a un gráfico<sup>16</sup> que refleje en el eje de abscisas el número de golpes y en el eje de ordenadas la humedad (ambos en escala logarítmica), obteniendo así el límite líquido de la muestra.

Para la determinación del límite plástico de una muestra de suelo, se actúa según la norma UNE 103104:1993<sup>17</sup>

<sup>14</sup>Para la realización de dicho experimento siempre recurriremos a la normativa de referencia.

<sup>15</sup>UNE 103300:1993 Determinación de la humedad de un suelo mediante secado en estufa.

<sup>16</sup>La norma UNE 103103:1994 Determinación del límite líquido de un suelo por el método del aparato de casagrande, en su ANEXO A incluye modelo para expresión de resultados.

<sup>17</sup>UNE 103104:1993 Determinación del límite plástico de un suelo.

Materiales necesarios para el ensayo:

- A. Espátula de hoja flexible.
- B. Pesasustancias con tapa.
- C. Balanza de 100 gr como mínimo y precisión de 0.01 g.
- D. Tamiz de 400  $\mu\text{m}$  según.
- E. Superficie lisa.
- F. Estufa de desecación de temperatura regulable hasta 115 °C.
- G. Pinzas, frasco lavador y agua destilada.
- H. Varilla de 3 mm de diámetro (para la comprobación del grosor de los cilindros).

Una vez preparada la muestra a ensayar según la norma de referencia, se toma la mitad de la misma y se moldea en forma de elipsoide para a continuación hacerla rodar entre los dedos de las manos y la superficie lisa hasta formar un cilindro. Si al llegar a un cilindro de 3 mm de diámetro no se ha resquebrajado, se parte en 6 u 8 trozos que se amasan nuevamente juntos hasta que se vuelva a conseguir un elipsoide. Se repite el proceso hasta que el cilindro se resquebraje. Si el resquebrajamiento se produce siendo mayor de 3 mm el diámetro del cilindro, el experimento se dará por finalizado.

Se colocan las porciones obtenidas (mínimo 5 g) en un pesasustancias y se determina el contenido de humedad de acuerdo con la norma UNE 103300:1993

Resultados: el límite plástico es la media aritmética de las humedades de ambas determinaciones, expresadas en %, sin añadir las palabras "por ciento"

La norma UNE 103104:1993 señala como características representativas de la plasticidad de un suelo al Límite Líquido y al Índice de Plasticidad. Este último se define a su vez como la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico, es decir:  $IP = LL - LP$

#### 1.1.2.4. Pruebas experimentales para la caracterización de tierras. Pruebas de campo. Ensayos "in situ" empíricos.

##### ENSAYOS ORGANOLÉPTICOS: VISTA, TACTO Y OLFATO.

Existen también una serie de pruebas de campo que, si bien no se trata de métodos experimentales, pueden arrojar una importante información acerca de la validez de la tierra, además de que se pueden realizar in situ.

##### Análisis de sedimentación simple o test del vidrio:

Permite obtener un conocimiento aproximado de la composición de un suelo en base a la decantación de los distintos componentes.

El procedimiento, según la fuente consultada, puede presentar algunas diferenciaciones, por ejemplo:

- A. En la publicación de Fermín Font y Pere Hidalgo, Arquitecturas de Tapia<sup>18</sup> se establece la toma de una muestra de material, excluyendo las gravas. A continuación se disgrega manualmente y se introduce en una botella o frasco de cristal. Se el doble de cantidad

---

<sup>18</sup>Font, Fermín; Hidalgo, Pere. Arquitecturas de Tapia. 2009, 195, Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Castellón, Castellón

de agua, se agita la mezcla y se deja reposar hasta que el agua del interior se muestre completamente clara.

- B. En el trabajo titulado "Selección de suelos y métodos de control en la construcción con tierra"<sup>19</sup> de Célia M. Martins Neves, Obede Borges Faria, Rodolfo Rotondaro, Patrício Cevallos Salas y Márcio V. Hoffmann se establece una metodología similar, aunque difiere la proporción de agua y tierra, estableciéndose en este caso 2/3 de agua por 1/3 de tierra. En el momento de la mezcla se recomienda la adicción de un poco de sal ya que facilita la separación de las partículas de arcilla (aunque en exceso puede producir el efecto contrario). Se agita. se dejar reposar durante una hora y se agita nuevamente para dejarlo en reposo en una superficie horizontal.

Las primeras en decantar serán las arenas, ya que se trata de las partículas más pesadas, seguidas por los limos y por último las arcillas. En ambos casos, una vez transcurrido el tiempo necesario de reposo, la obtención de resultados se obtiene por medición de la altura de las distintas capas. En el caso de que la muestra contuviese materia orgánica, esta quedaría flotando sobre el agua.

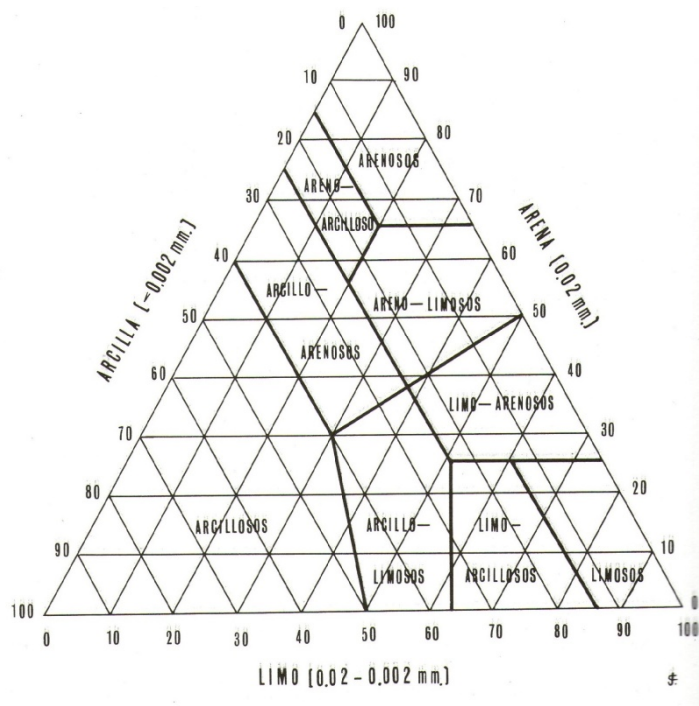


Ilustración 4: Diagrama triangular de texturas (Guitian Ojea, y otros, 1982)

### El color

En función del mismo, se establece el tipo de tierra ya que los colores claros son característicos de los suelos inorgánicos, mientras que los oscuros son propios de los orgánicos.

Existe una clave internacional para la determinación del color de los suelos, la

"Munsell soil color charts"

<sup>19</sup>NEVES, Célia Maria Martins; FARIA, Obede Borges; ROTONDARO, Rodolfo; CEVALLOS, Patrício S.; HOFFMANN, Márcio Vieira. (2009). Selección de suelos y métodos de control en la construcción con tierra – prácticas de campo. Disponible en <http://www.redproterra.org>.

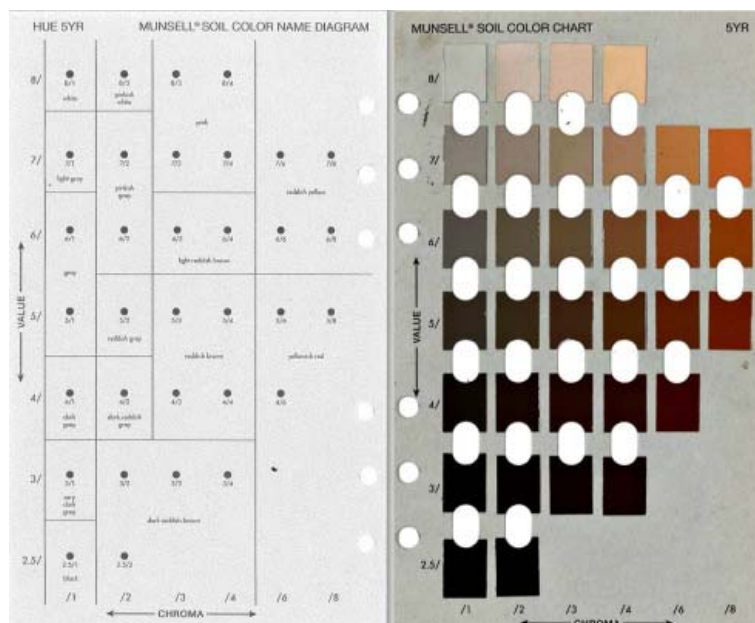


Ilustración 5: Munsell color charts(Jordán, 2014)



Ilustración 6: Arcillas. III Xornadas Bioconstrucción: Con Terra. Aplicacións Construtivas. Organiza Espiga: Asociación Galega para a Bioconstrucción. (Elaboración propia)

### Tacto

A través del tacto se manifiestan las distintas partículas contenidas en la tierra.

Para determinar el contenido de arena, limo y arcilla la UNE-EN ISO 14688-1:2003 establece como metodología el frotar una pequeña muestra entre los dedos, añadiendo agua si fuese necesario. La fracción de arena se determina a partir del grado en el que el material se aprecie arenoso al tacto, no así la presencia de limos y arcillas.

### Brillo

La misma norma UNE-EN ISO 14688-1:200320 señala que para determinar la presencia de limos o arcillas, se corte una muestra del terreno en estado natural. Si se aprecia una superficie brillante al corte, el suelo manifiesta la presencia de arcillas. Sin embargo, si la superficie de corte es mate, el suelo contiene limos o se trata de un limo-arenoso-arcilloso de baja plasticidad.

## ENSAYOS DE COHESIÓN.

### Test o prueba de la caída de la bola

Tiene por objeto la aproximación al contenido de arcilla de la muestra. Al igual que pasa con el test del vidrio, según la fuente consultada el procedimiento difiere ligeramente:

- A. Según Fermín Font y Pere Hidalgo se toma una muestra con la que se pueda elaborar una bola de unos 4 cm de diámetro. Una vez tengamos la bola, la se deja caer desde una altura de 1.50 m
- B. Según "Selección de suelos y métodos de control en la construcción con tierra" de Célia M. Martins Neves, Obede Borges Faria, Rodolfo Rotondaro, Patrício Cevallos Salas y Márcio V. Hoffmann, el diámetro de la bola será de unos 3 cm y la altura de caída 1 m.

### Palmeteo

Se toma una porción de finos lo suficientemente grande como para hacer una bola del tamaño de un huevo pequeño humectándola hasta dar cohesión al material, pero sin que resulte pegajoso. A continuación se coloca la bola sobre una palma de la mano mientras se golpea con la otra hasta que rezume agua la superficie.

### Resistencia

Esta prueba determina el contenido de arcilla de un suelo.

Se toma una muestra y se humedece hasta que sea moldeable. A continuación se realizan cinco tabletas de dimensiones 5\*5\*1 cm y se dejan secar al sol. Una vez secas, se tratarán de pulverizar con los dedos.

### Prueba de la cinta

Similar a la prueba del rodillo. Se humedece la muestra de material de tal forma que al hacer un "rollito" sobre la mano el material se desmenuce al alcanzar un diámetro de 3 mm. A continuación se formará un cilindro de 10 a 15 mm de diámetro, se coloca sobre la mano y se comenzará a formar una cinta de 3 a 6 mm de espesor dejándola pender libremente. Llegado el momento, la cinta se romperá. Se anotará la longitud máxima que alcance la cinta sin que se rompa y en función de la misma, atendiendo a la siguiente tabla se obtiene el resultado:

Resultado	Longitud de rotura	Tipo de finos
Cinta larga	15-30 cm	Muy arcillosos

---

<sup>20</sup>UNE-EN ISO 14688-1:2003 Ingeniería geotécnica. Identificación y clasificación de suelos. Parte 1: Identificación y descripción. (ISO 14688-1: 2002)



Cinta corta	5-15 cm	Contenido medio de arcillas
No forma cinta	-	Arcilla escasa

Tabla 3: Caracterización de suelos según la prueba de la cinta (Baulúz, y otros, 1992)

### Rollito

Se toma una muestra de tierra y se moldea una bola de 2 cm de diámetro y con el contenido de humedad suficiente como para moldearla con facilidad. Posteriormente se hará rodar sobre una superficie plana hasta formar un rollito cada vez más fino. Si dicho rollo se desmenuza antes de alcanzar los 3mm se considerará el material como muy seco y se procederá a amasar de nuevo. Cuando el cilindro se rompe a los 3mm de diámetro, significa que tiene el contenido óptimo de humedad para la prueba.

Se hará una ola rápidamente y se tratará de romper con el índice y el pulgar. En función de la presión ejercida sobre la bola, se obtiene el resultado de acuerdo a la siguiente tabla:

Resultado	Tipo de finos
Presión alta	Mucha arcilla, puede que excesiva para paredes de tierra.
Presión media	Rompe fácilmente. Puede ser válida.
Presión débil	Mucho limo o arena y poca arcilla. Puede ser válida.
Presión nula	Si no se forma el rollito con ninguna humedad, no contiene arcilla.
Esponjoso	Suelo orgánico. No válido.

Tabla 4: Caracterización de suelos según la prueba del rollito (Baulúz, y otros, 1992)

## **1.1.3. Técnicas**

### **1.1.3.1. Construcción con tapia: tradición.**

La Real Academia Española define:

#### **Tapia:**

Cada uno de los trozos de pared que de una sola vez se hacen con tierra amasada y apisonada en una horma.

Esta misma tierra amasada y apisonada.

Pared formada de tapias.

Muro de cerca.

#### **Tapial:**

Molde de dos tableros paralelos en que se forman las tapias.

Trozo de pared que se hace con tierra amasada.

Pared formada de esta manera.

En el presente trabajo se entiende por tapial el molde y por tapia a todo muro construido con tapiales.

En Europa, a raíz de la crisis del petróleo de los años 70, una parte de la población comenzó a mostrar nuevamente sensibilidad por una técnica de construcción milenaria que había caído en decadencia hasta desaparecer a principios del S.XX, el tapial. Ante la irrupción de materiales industriales procedentes de lugares lejanos, algunos profesionales así como investigadores del sector de la construcción, toman conciencia de la escasez de los recursos naturales, por lo que tomaron la iniciativa de recuperar antiguas técnicas de construcción y materiales.

Esta sensibilidad en España tardó un poco más en llegar, y no fue hasta hace escasamente veinte años, la técnica volvió a surgir aunque tímidamente.

Pero no es hasta hace escasamente siete años, y tras el pinchazo de la llamada "burbuja inmobiliaria" cuando se produce el giro hacia la bioconstrucción. Jóvenes técnicos, con un renovado interés, pretenden realizar un tipo de construcción que sea respetuosa no sólo con el medioambiente, sino también con la salud de las personas.

Construcción tradicional y bioconstrucción presentan en común:

1. Su **carácter funcional**. Se busca la solución de necesidades con el mínimo gasto de energía, dejando a un lado el aspecto estético.
2. El máximo **aprovechamiento de los recursos** disponibles en el entorno, aunque en el caso de la arquitectura popular fuese por obligación.
3. El **valor subjetivo** de cada una de ellas.

Pero también diferencias:

1. La construcción tradicional carece de tradición teórica. Consiste en la puesta en práctica de tradiciones reinterpretadas y adaptadas continuamente en función de las necesidades. En cambio, la bioconstrucción toma como punto de partida la teoría arquitectónica primando el respeto hacia el medioambiente y la salud de las personas.
2. En la bioconstrucción toma importancia la enseñanza reglada, en la mayoría de los casos alejada de la oficial, para nuevamente tomar importancia la experiencia personal.

Para Castellarnau & Rivas (2013), el acercamiento a la bioconstrucción desde la construcción tradicional trata no tanto del acercamiento al conocimiento de una determinada técnica constructiva, en este caso la tapiería, sino más bien en la adecuación de los medios disponibles en el entorno cercano para así conocer mejor su relación íntima con su entorno natural y social.

## CLIMA

Monforte de Lemos posee un clima mediterráneo-mesomediterráneo. Se sitúa a 300 m. de altitud.

*"Presenta una temperatura presenta una temperatura media anual de 13,4 oc; la temperatura media de las mínimas del mes más frío se sitúa en los 2,4 oc; y la media de las máximas de ese mismo mes en 11,20 °C. Si a esto se añade una precipitación anual de 823 mm con una notable sequía veraniega -39 mm en junio, 12 en julio y 23 en agosto-, los índices climatológicos resultantes colocan la comarca en una situación marcadamente mediterránea -Im1= 10,2 (>4,00); fm2= 6,4 (>3,5}; Jm3= 4,6 (>2,5}"*

(Freire, 1998)

## GEOLOGÍA

El valle de Monforte se compone de una superficie de erosión principal premiocena, perfecta sobre los granitos y bastante desigual sobre los esquistos y cuarcitas. Está constituida por depósitos detríticos muy finos que, en algunos lugares, alcanzan los 100 m. de espesor. Son arcillas rojas o verdes que se hacen arcósicas hacia arriba. Se trata de un depósito y no de una alteración "in situ" como lo demuestran los granos de cuarzo perfectamente redondeados. La presencia de corrosiones en las gravas de cuarzo indican un clima tropical en el cual la sílice es atacada fácilmente.

La sucesión de capas alternas, oxidadas y reducidas, implica una sedimentación en condiciones pantanosas y no el depósito en un lago profundo, como podría esperarse por la selección granulométrica del material.

### PERFIL 1.129

Tipo de suelo : *Pseudogley*.

Provincia : Lugo.  
Localidad : Rivas Altas, Monforte.  
Situación : Km 48 de la carretera de Lugo a Monforte.  
Altitud : 360 m.  
Topografía : Ondulada suave.  
Orientación : S.  
Pendiente : 0-5º.  
Roca madre : Sedimentos arcillosos terciarios.  
Condiciones de agua : Drenaje interno impedido.  
Vegetación : Brezal.

### MORFOLOGÍA

<u>Hor.</u>	<u>Prof. (cm)</u>	
A	0-10	Orgánico, pardo rojizo (5 YR 5/2), con restos de brezal en sus primeros centímetros, humus bruto; gravas de cuarcita; pasa insensiblemente a más compacto y estructurado.
g <sub>1</sub>	10-60	Mineral, de color abigarrado verde oliva pálido (5 Y 6/2) y pardo claro (7,5 YR 5/4); arcilloso; estructura poliédrica irregular; plástico; compacto y duro aún en época de lluvias; agrietado; emigración local de Fe y canales de oxidación a lo largo de las raíces de plantas leñosas que penetran en profundidad.
g <sub>2</sub>	+60	Sedimentos arcillosos y gravillosos abigarrados, con predominio de colores rojos y verdes; agrietado; en las fisuras se observa deposición de óxidos de hierro.

Ilustración 7: Perfil 1129: Rivas Altas, Monforte de Lemos(Guitian Ojea, y otros, 1982)

El pseudogley es un suelo típico de países templados-húmedos. Limosos o arcillosos, compactos se caracterizan por la variación del nivel del agua (en los períodos secos, las capas superiores del suelo están libres de agua).

La materia orgánica del horizonte A está formada por humus distrófico, bajo el cual se encuentra una orla de arenas de cuarzo lavado.

El horizonte g1, horizonte de pseudogley, de color gris-verdoso con manchas ocre y oscuras.

Horizonte g2: descansa sobre el horizonte g1. Es más impermeable y compacto. Su impermeabilidad con respecto al horizonte g1 obliga a la acumulación de agua en el horizonte g1, el cual no encuentra drenaje libre. Esta capa de agua es la condición necesaria para la formación del pseudogley y recibe el nombre de Staünasse por los edafólogos alemanes y nappe percheé por los franceses. Durante la estación seca esta capa desaparece casi en su totalidad por evaporación y el suelo se hace seco superficialmente. Según Mückenhausen, para la formación del pseudogley es necesaria una pluviosidad superior a 500 mm. anuales, una temperatura media anual moderada (temperatura media ligeramente inferior a 12°C) y una humedad relativa del aire no demasiado baja (superior al 60%) condiciones que, se adaptan perfectamente al clima de la zona.

## LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

La situación de la comarca, debido a su proximidad con Castilla León, donde la técnica es abundante, las rutas de peregrinación a Santiago y la llegada del ferrocarril en 1883 serían algunas de las posibles causas del empleo de la técnica.

## EL TAPIAL

El tapial es un tipo de encofrado deslizante y modular. Tradicionalmente se componen de:

- A. Dos tableros laterales formados por tablas horizontales de unos 3 - 5 cm de espesor, 20 cm de altura y 2.20 m de longitud. Se colocaban con una separación entre sí en torno a los 2 - 3 mm, llamados cejas, que ejercían la función de juntas de dilatación. Se reforzaban con costillas verticales de escuadría 5 \* 10 cm y colocadas cada 50 - 80 cm.
- B. Dos tapas de fondo o fronteras. Estas piezas determinaban el ancho de la tapia. Se componían de tablas del mismo espesor que las empleadas en los tableros y se colocaban horizontal o verticalmente. En la parte superior se unían a otra pieza de madera de mayor longitud llamada "oreja" que hacía de tope contra los traveseros y al mismo tiempo facilitaba el traslado de la pieza.
- C. Las agujas: primeramente eran de madera para a partir de los años 20 pasar a usarse de hierro. Generalmente se usaban 4, tres para montar el tapial y la cuarta para desplazarlo. Su sección podía ser circular, con 2 cm de diámetro o cuadrada con 2 cm de arista. Sobre ellas descansan los tableros y se encajan los costales para proporcionar así una correcta sujeción inferior al sistema.
- D. Costales: piezas de madera que encajaban sobre las agujas gracias a la ranura existente en su parte inferior. Cubrían la totalidad de altura de los tableros. Su función radica en mantener la distancia entre los tableros, rigidizar el conjunto e impedir que los tableros se abran bajo la presión de la tierra.

- E. Agujas superiores: su función era la de sujeción de los codales en la parte superior. Debido a la ranura existente en su superficie, permitían el paso de los codales a través de ellas y el acuñado del mismo para así garantizar la rigidez del conjunto.
- F. Codales: Piezas de madera de forma troncocónica, se sección superior a la de las agujas, cuya función principal es la de mantener la distancia entre los tableros durante el proceso de montaje y comienzo del apisonado del tapial. Antes de completar la tapiada se alojaban en la masa de tierra para una vez finalizada retirarlas y posicionar en su lugar las agujas.

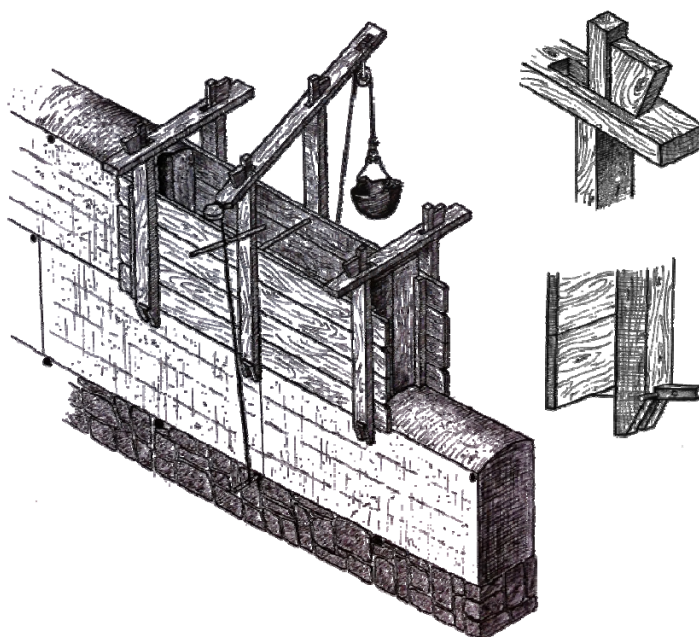


Ilustración 8: Tapial tradicional de la comarca de Els Ports de Castellón. (Font & Hidalgo, 2009)

El pisón: Los más utilizados son los pisones de mano, aunque si se hace necesaria una mayor rapidez en la ejecución o se trata de elementos de dimensiones considerables también se emplean los mecánicos, ya que el tiempo de apisonado puede reducirse de dos a cinco veces (Baulúz & Bárcena, 1992)

En los pisones de mano es clave tanto sus dimensiones como su peso, y a la vez ser adecuado a la complejidad del operario. Suelen componerse de un mango de madera, y una o dos cabezas (en los más pesados). La punta es de madera o acero y puede ser plana o en ángulo de hasta 120 °. Su altura total va desde los 120 - 180 cm, el diámetro del mango es de 4 - 6 cm y el peso varía de los 6-12 kg (dependiendo del operario)

En cuanto a los pisones neumáticos, su peso varía entre los 10 - 15 kg, la cabeza puede ser de 15 \* 15 cm y la presión necesaria de 5 Kg / cm<sup>2</sup> y el compresor de un rendimiento de 750 l/min (Baulúz & Bárcena, 1992).

Cabe mencionar que el tipo de pisón tradicional empleado se hizo propio de cada zona o región, así en Ecuador es normal encontrar los pisones de dos cabezas mientras que en Marruecos es normal que sean de forma cúbica o cilíndrica.



Emulsión asfáltica	Arenoso $w_p < 13$	Incremento de resistencia húmeda y reducción de resistencia seca.  Disminución absorción.	Adobe  (Bloque comprimido)  (Tapia)
--------------------	--------------------	---	---

Tabla 5: Tabla para la elección de estabilizantes. (Baulúz & Bárcena, 1992)

Cemento Portland: se utiliza para suelos arenosos en porcentaje del 3 -8 % de la tierra seca. La resistencia que aporta el cemento depende de cómo se haya mezclado con la tierra ya que debe mezclarse con el suelo seco y sin terrones. Una vez añadida el agua debe utilizarse de inmediato ya que comienza el proceso de fraguado debiendo mantenerse húmedo los siete días siguientes cubriéndolo con sacos o paja, momento en el que alcanza la mayor parte de su resistencia.

Cal: suele usarse en los suelos arcillosos a los que fortalece, además ayuda a deshacer los terrones en este tipo de suelos por lo que no presenta grandes problemas para su mezcla. El endurecimiento de esta mezcla, es largo en el tiempo, aumentando progresivamente durante varios meses.

Cal + cemento: de aplicación para suelos demasiado arcillosos para estabilizarlos con cemento y demasiado poco arcillosos para que la cal reaccione con ellos para incrementar su resistencia. Suele emplearse en proporción 1:1 y en cantidades alrededor del 2% de cada componente.

Emulsiones asfálticas: se trata de mezclas de asfalto con agua (ya que es más fácil de mezclar que la tierra con el asfalto). Es adecuado sobre todo para adobes ya que mejora su coeficiente de absorción y su resistencia húmeda, pero disminuye la seca a corto plazo. Para el tapial o bloque comprimido no es del todo adecuado ya que aumenta el contenido de agua de la mezcla más allá de los límites aceptables.. Se utiliza en cantidades en torno al 3-6 % del suelo seco.

Sea cual sea el tipo de estabilizante elegido, siempre deben realizarse ensayos para verificar la idoneidad de la mezcla.

## EJECUCIÓN

### Sistemas de cimentación y análisis de los mismos.

Los sistemas de cimentación para los muros de tapia, deben cumplir con las siguientes exigencias:

1. Distribución uniforme de la carga.
2. Resistente a los agentes atmosféricos como el agua de lluvia, capilaridad, nivel freático y corrientes de ladera.
3. Resistencia a cargas dinámicas sísmicas.
4. Compatibilidad de deformación con la pared.
5. Que funcione como barrera frente a roedores, termitas, hormigas, ...

6. Coste adecuado al del resto de la edificación

7. Utilización de materiales locales.

Así, entre los sistemas de cimentación tradicionales destacan:

Sistemas tradicionales en Castilla:

- A. Mampuestos de piedra como material básico.
- B. Mortero de cal y arena, y a veces barro.
- C. Zócalo de piedra.

Sistemas tradicionales americanos.

- A. Zanja rellena con mampostería asentada sobre barro: no cumple las condiciones 2, 3 y 5 anteriores.
- B. Zanja rellena con mampostería asentada sobre mortero de cal y arena: No funciona frente a capilaridad, nivel freático y corrientes de ladera.
- C. Arranque de la pared directamente desde el suelo. Habitual en las zonas de montaña debido a la escasez de materiales, pero rechazado debido a su ineficacia.

Sistemas actuales:

- A. Mampostería con mortero de cemento Portland y arena: cumple con todos los requisitos a excepción de la resistencia a cargas dinámicas sísmicas.
- B. Tierra con protección de piedra: cumple con todos los requisitos a excepción de la resistencia a cargas dinámicas sísmicas.
- C. Tierra en zanja impermeabilizada: no cumple con la resistencia a cargas dinámicas sísmicas y como barrera frente a roedores, termitas, hormigas, ...
- D. Terrocemento<sup>22</sup>: No es resistente a los agentes atmosféricos como el agua de lluvia, capilaridad, nivel freático y corrientes de ladera ni funciona como barrera frente a roedores, termitas, hormigas, ...
- E. Alternancia de capas de piedra y terrocemento. No es resistente a los agentes atmosféricos como el agua de lluvia, nivel freático y corrientes de ladera
- F. Hormigón en masa o armado. Cumple todas las exigencias salvo que es más rígido que la pared de tierra lo que puede producir movimientos incompatibles. Además, el hormigón no puede ser considerado como material local.

Estos sistemas se completan para asegurar la simultaneidad de deformaciones con:

- Varas de madera de enlace entre cimiento y muro.
- Perfil machihembrado en la junta de la pared con el cimiento para impedir el deslizamiento.
- Enlace del cimiento con la solera de atado de los muros en cabeza, por medio de tiras de madera, barras de hierro o cañas.

### Sistemas de muros

---

<sup>22</sup>Tierra mezclada con un 5% de cemento Portlan apisonada.



El sistema común es el más utilizado. Se ejecutan los tapiales sin ningún elemento de unión entre ellos. Los adobones se disponen con las juntas verticales escalonadas entre sí, procurando no crear líneas de junta que formen más de 60 ° con la horizontal, para mantener la resistencia del material a esfuerzo cortante.

Con breccas de mampostería y yeso: muy común en la Mancha. Se ejecutan en las esquinas, encuentros de muros, y bordes de huecos para proteger a la tapia de los golpes, mejorar la traba y reforzar los puntos débiles bajo los cargaderos.

Entre los tableros de madera del tapial se vierte las tongadas de tierra en un espesor en torno a los 20 cm de tierra seleccionada, para a continuación ser compactado mediante golpes con el pisón hasta reducir dicha tongada a la mitad de su espesor original, es decir, unos 10 cm

### 1.1.3.2. Construcción con tapia: actualidad

En la construcción de la tapia tradicional, los tapiales (encofrados) y los pisones eran de madera dura y resistente cuyas características y dimensiones se han ido adaptando según localización geográfica debido a la experiencia.

Estos métodos resultaban baratos debido a que en el pasado el precio de la mano de obra era reducido y las exigencias en materia de seguridad y prevención de riesgos laborales prácticamente no existía, o por lo menos no tenían la relevancia actual. Sin embargo esta situación es impensable en la actualidad, por lo que para que esta manera de construir gane poco a poco terreno, debe producirse un abaratamiento de los costos de mano de obra aumentando los rendimientos en la producción e introduciendo mejoras en los medios auxiliares que los hagan más seguros y sencillos de utilizar.

Por todo ello, en las últimas décadas se han ido empleando diferentes tipos de encofrado provenientes de la industria del hormigón. Esto, unido al empleo de medios auxiliares para la elevación de materiales han permitido aumentar en rendimiento en la realización de obras de gran envergadura.



Fotografía 1: III Jornadas Bioconstrucción: Con Terra. Aplicacións Construtivas. Organiza Espiga: Asociación Galega para a Bioconstrución (elaboración propia)



Fotografía 2: III Jornadas Bioconstrucción: Con Terra. Aplicaciones Construtivas. Organiza Espiga: Asociación Galega para a Bioconstrución (elaboración propia)



Fotografía 3: III Jornadas Bioconstrucción: Con Terra. Aplicaciones Construtivas. Organiza Espiga: Asociación Galega para a Bioconstrución (elaboración propia)

A pesar de los avances en cuanto al rendimiento y seguridad que presentan estos elementos, los sistemas tradicionales conviven con lo industrializados ya que para trabajos de pequeña envergadura, como puede ser el caso de una vivienda unifamiliar, siguen resultando más rentables los medios tradicionales.

Tipos de encofrados industriales:

- A. Tipo diwidag: consiste en el empleo de tableros de madera sujetos mediante correas horizontales y verticales conectadas con varillas y tuercas y atirantándose con varilla roscada.

B. Con tablero fenólico con marco metálico sujetos mediante varillas envainadas en tubo de PVC y tuerca

En ambos casos, una vez extraídas las varillas o diwidag las vainas se quedarán en el interior mostrando los característicos agujeros de los muros de hormigón.

En cuanto al vertido de la tierra en el interior del encofrado, tradicionalmente se utilizaban las "espuestas" que eran unos simples cestos de mimbre que se subían mediante un sistema de poleas. En la actualidad, el empleo de pisones vibrantes hace que los rendimientos de trabajo sean muy superiores, de 2 a 5 veces (Baulúz, y otros, 1992), por lo que se aconseja el empleo de medios auxiliares para la elevación del material.

El empleo de pisones vibrantes han supuesto una más que notable mejora en los rendimientos de ejecución además de una mejora en la calidad de la compactación que proporciona una mejor resistencia mecánica del elemento. Dentro de los pisones mecánicos, el más utilizado es el impulsado por aire comprimido ya que permite regular la potencia de compactación.

CAPILLA DE LA RECONCILIACIÓN. BERLÍN, ALEMANIA. (2000)

La capilla de la Reconciliación, obra de los arquitectos Reitermann y Sassenroth, se ubica en la llamada Franja de la Muerte, en el mismo emplazamiento donde se ubicada la antigua Iglesia de la Reconciliación, volada en 1985 por las tropas de la RDA. En los años previos a su construcción surgen iniciativas para conservar el altar y las campanas salvadas y levantar un lugar conmemorativo al Muro de Berlín.

Se compone de una envolvente exterior de láminas de madera de pino Douglas y un muro interior de tapia de 60 cm de espesor, 7 m de altura, 43 m de longitud y diámetro entre 10 y 14 m. El recinto del altar se compone de 390 toneladas de arcilla compactada mezclada con ladrillos rotos de la derruida Iglesia de la Reconciliación.

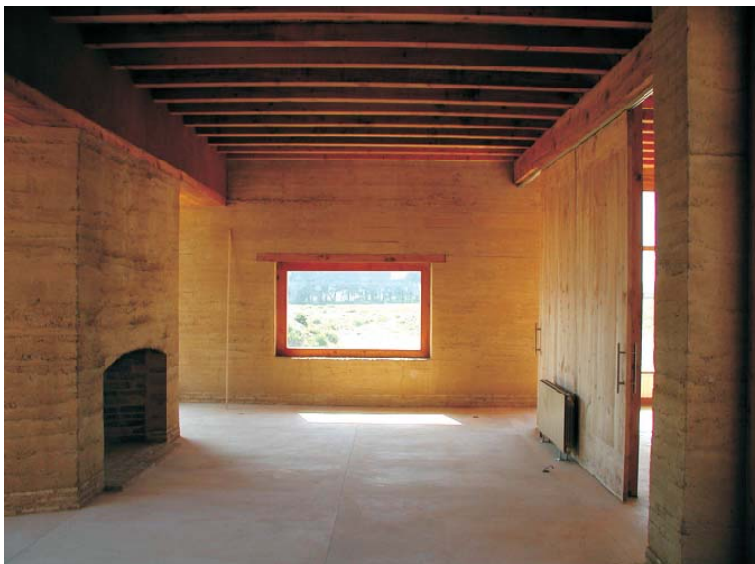
La Capilla de la Reconciliación fue el primer edificio público construido en tierra en Europa en los últimos 150 años. Debido a que la técnica de construcción no estaba autorizada, el Departamento de Estructuras Portantes y Construcción de la Technical University de Berlín se encargó del proyecto como un “caso singular de autorización”.



Fotografía 4: Capilla de la Reconciliación. Berlín ([www.mundoflaneur.com](http://www.mundoflaneur.com))

### BODEGA EN LANCIEGO, ÁLAVA, ESPAÑA (2008)

Proyectada y dirigida por Diego Garteiz y Paul Basañez, la bodega está formada por un conjunto de naves con orientación N-S para facilitar la ventilación natural. Se ejecutaron muros de tapia para obtener una regulación natural de la humedad en el interior. Además, las cubiertas se recubrieron con tierra del lugar para incrementar su inercia térmica. Los encofrados utilizados fueron los tipo "diwidag" y apisonado neumático, a cargo de la empresa Betao e Taipa, Lda.



Fotografía 5: Bodega en Lanciego (A.P.Arquitecturas S.L.)

### "BACK 40" HOUSE, TUCSON, ARIZONA, EE.UU (2006)

Se trata de una casa de huéspedes diseñada por Gallo Powell Consortium inspirada en las casas construidas por el "Pit Hohokan"<sup>23</sup>. Se cavó un hueco de 60 cm de profundidad en el suelo para moderar las temperaturas interiores propias del clima desértico de la zona. Para la construcción se utilizó la propia tierra extraída del lugar, estabilizada con un 4% de cemento. Los cerramientos de tapia se ejecutaron de 45 cm de espesor, ligeramente angulados al sur (para captar únicamente el sol de invierno) y con pequeñas aberturas al exterior para minimizar las ganancias solares (nunca superiores a 30 cm de ancho por lo que no requieren dinteles). La cubierta se ancla a la pared mediante varillas roscadas que se extiende por el interior del muro hasta la cimentación.

---

<sup>23</sup>Se trata de una tribu indígena que habitó la cuenca del Río Tucson.



Fotografía 6: "Back 40" House, Tucson, Arizona (Gatti, 2012)

#### CENTRO DE VISITANTES EN EDEN PROJECT, CORNWALL, REINO UNIDO. (2001)

Obra del arquitecto Nicholas Grimshaw, el proyecto se ubica en una vieja cantera de caolín, en el sudoeste de Inglaterra. Se compone de un sistema de cupulas geodésicas que cubre unos 858 m<sup>2</sup> de terreno.

Se levantaron en torno a 7,5 m<sup>2</sup> de muro cada día con un espesor medio de 55 cm (10 toneladas de tierra).

Los muros de tapia, en forma de talud, fueron contruidos posteriormente a la cubrición, reduciendo así los controles de la misma ya que la tierra se encontraba cubierta y evitando que se humedeciese en exceso. Esta sección de talud en el muro presenta la ventaja de una mayor estabilidad del conjunto, pero el inconveniente de que dificulta las labores de compactado de tierras en el encofrado.

La tierra utilizada estaba formada por arcillas de baja expansividad y un alto contenido en áridos. Esta tierra estaba situada a una profundidad de entre 2 y 3 metros, sobre la capa de arcillas de caolín que era el material principal de extracción de la cantera.





Fotografía 7: Eden Project ([www.rammedearthconsulting.com](http://www.rammedearthconsulting.com))

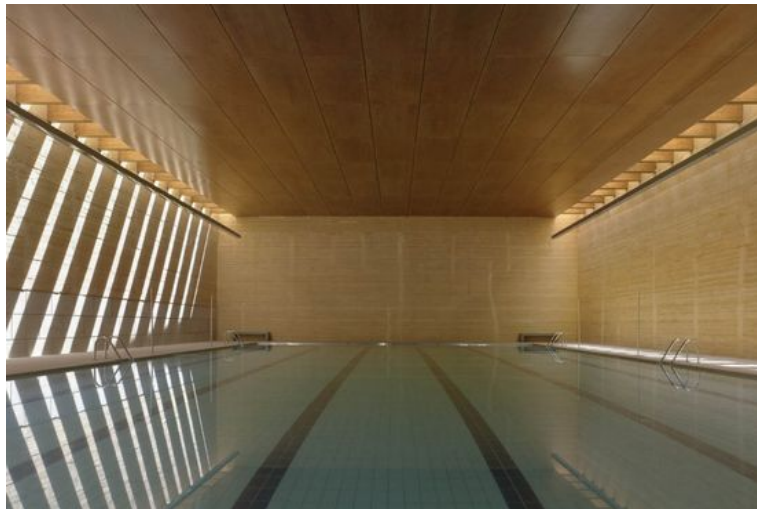
#### PISCINA CUBIERTA CLIMATIZADA MUNICIPAL DE TORO, ZAMORA, ESPAÑA (2010)

Se trata de un edificio de tres plantas, proyectado por el estudio Vier Arquitectos S.L.

En la planta baja, en la cual se organizan vestidores, servicios, oficinas y acceso a la piscina, los muros son de tapia de tierra estabilizada con cemento blanco, cal aérea a los que se han efectuado una corrección granulométrica añadiendo gravas, formando así un cerramiento de unos 60 cm de espesor. Son de tierra vista y sin costra. Para su protección se ha aplicado un producto con siloxanos de base orgánica. Destacan los lechos de mortero de cal dentro de la masa de tierra y a distancia de medio metro entre sí, que se manifiestan en el paramento. Los encofrados utilizados fueron tableros de madera con estructura metálica y el apisonado mediante compactador neumático. Al igual que en el caso de la Bodega en Lanciego, los trabajos de tapiería corrieron a cargo de la empresa portuguesa Betao e Taipa, Lda.



Fotografía 8: Vista exterior del muro de tapia (Arquitecturas de Tapia)



Fotografía 9: Piscina municipal de Toro, Zamora, España. (blogs.elpais.com)

#### ESCUELA INFANTIL EN SANTA EULÀLIA DE RONÇANA, BARCELONA, ESPAÑA (2010)

Los arquitectos responsables del proyecto han sido Gabriel Barbeta, Esteban Navarrete, Laura Barbera y Jordi Caminero. Se trata de una escuela infantil para niños de hasta 3 años de edad está formada por seis cúpulas sustentadas por muros de tapia de trazado curvo para los cuales se ha añadido a la mezcla de fibras de madera para mejorar su resistencia mecánica, perlita expandida para mejorar el aislamiento térmico y estabilizado con cemento blanco. Los paramentos exteriores se han protegido del agua de lluvia con resina de silicona mientras que a los interiores se les ha aplicado silicato potásico.

El encofrado se realizó con tablero contrachapado de pino adaptado a la curvatura mientras que el apisonado fue manual y realizado por la empresa Construim el Compluvium S.L.



Fotografía 10: Escuela Infantil Eulàlia de Ronçana, Barcelona ([www.construccion21.org](http://www.construccion21.org))

#### DEEPANAM SCHOOL, AUROVILLE, INDIA (1995) CÁTEDRA UNESCO DE ARQUITECTURA EN TIERRA.

El Instituto de la Tierra de Auroville trabaja desde hace 25 años en la enseñanza de técnicas de construcción con tierra, especialmente técnicas de tierra comprimida como el BTC, para animar a la gente a la construcción de sus propias viviendas. Se puede afirmar que el BTC constituye una tapia e pequeñas dimensiones ya que tanto su composición como contenido de humedad es semejante.

En Auroville, la tierra es apisonada mediante medios manuales. Hasta 1994 únicamente existía una vivienda realizada mediante esta técnica. Los muros construidos con tierra estabilizada o tapia fueron promovidos a raíz de la construcción de la escuela Mirramukhi, actualmente llamada Deepanam. Esta técnica, presenta la ventaja de ser más económica que la construcción mediante BTC. Actualmente centran sus investigaciones en el desarrollo de estabilizantes e impermeabilizantes alternativos al cemento.

El Centro de Formación del Instituto de la Tierra de Auroville está construido en su totalidad con tierra estabilizada, desde los cimientos hasta la impermeabilización:

- A. Cimentación: a base de tierra estabilizada con el 5% de cemento.
- B. Cerramientos: a base de tierra apisonada y tierra estabilizada con el 5 % de cemento además de una lechada homeopática de cal.
- C. Columnas: de forma circular y huecas a base de BTC's reforzados con cemento
- D. Vigas: en forma de "U" a base de BTC's y reforzadas con cemento.
- E. Bóvedas a base de BTC's.
- F. Estabilizadores alternativos al cemento (leche "homeopático" de cal y alumbre)  
Impermeabilización alternativa, a base de tierra estabilizada (varias mezclas de tierra, arena, cemento, cal, alumbre y el jugo semillas)





Fotografía 11: Escuela Deepanam , Auroville ([www.earth-auroville.com](http://www.earth-auroville.com))



Fotografía 12: Centro de formación del Instituto de la Tierra , Auroville ([www.earth-auroville.com](http://www.earth-auroville.com))

## VIVIENDA EN ZARAGOZA, ESPAÑA

Diseñada por los arquitectos Gabriel Barbeta, Sandra Bestraten y Emili Hormias se trata de una vivienda en planta baja de 300 m<sup>2</sup> levantada sobre muros de tapia estabilizada con cemento y corrección granulométrica de 50 cm de espesor y protegida exteriormente mediante resina de silicona. La empresa constructora de los muros de tapia de la vivienda fue Construíum el Compluvium S.L. Igualmente, para el cierre del terreno de la propiedad, se han ejecutado muros de tapia a cargo de Javier Canapé. La técnica empleada fue la tradicional, es decir, encofrados de madera y apisonado manual.

## UNIVERSIDAD INDÍGENA CHIQUITANA, SAN IGNACIO DE VELASCO, BOLIVIA. (2003)

La Universidad Indígena de la Chiquitanía forma parte del programa Educación para el Desarrollo-Bolivia coordinado desde las asignaturas “Vivienda y Cooperación” y “Tecnologías de bajo coste para la Cooperación” de la Escola Tècnica Superior d’Arquitectura de Barcelona

(ETSAB) de la Universidad Politécnica de Catalunya. Se trata de un programa que busca promover las técnicas de construcción propias del lugar mediante proyectos llevados a cabo por voluntarios de la universidad y la participación de la población local.

Debido a que el edificio se ubica en una zona con estación de fuertes precipitaciones, el edificio se ha diseñado con grandes aleros y los muros se han protegido exteriormente con revoco de tierra y cal.

#### HALL DEL BODHI MANDALA ZEN CENTER, JEMEZ SPRINGS, NUEVO MÉXICO, EE. UU. (2003)

Se trata de un centro de estudios budistas, ubicado en clima extremo. Los muros de tapia protegen al edificio de los pronunciados saltos térmicos, manteniendo así temperaturas interiores confortables sin necesidad del aporte de energía de calefacción y/o refrigeración.



Fotografía 13: Hall del Bodhi Mandala Zen Center, Jemez Springs, Nuevo México (Nicholas Larranaga-Couty)

#### 1.1.3.3. Construcción con tapia: innovación:

##### OFICINAS IMPRENTA GUGLER PRINT&MEDIA, AUSTRIA

Se trata de una edificación realizada a base de una estructura de madera con una galería ejecutada bajo una cubierta de vidrio siguiendo el eje norte-sur del edificio. A lo largo de la galería, entre el entramado de madera estructural se alternan 160 elementos prefabricados de tierra apisonada de dimensiones 1.70\*0.40\*1.30.

Para la ejecución de dichos paneles fue necesario el empleo de 208 Tn de tierra, las cuales se extrajeron del propio emplazamiento. El tiempo necesario para la ejecución de los paneles en taller fue de tres meses y la puesta en obra tan solo dos semanas. El diseño tanto de la estructura como de las piezas de tierra prefabricadas fue concebido además de para facilitar el montaje, para que fuesen las piezas de madera las encargadas de absorber las tolerancias entre ambos sistemas mientras que el arriostramiento corre a cargo de los elementos prefabricados.

Estos tapiales prefabricados se aprovecharon además para incorporar los conductos de ventilación del edificio, los cuales captan aire del exterior y aprovechan las bondades térmicas de los elementos de tierra para refrigerar y/o calentar el interior de la edificación según la época del año.

En cuanto al proceso de construcción de los elementos de tapia, se puede establecer las siguientes fases:

1. Fabricación de las piezas en taller: prefabricación, secado y embalaje. Uno de los principales inconvenientes es que para las labores de embalaje, almacenaje y transporte se ha de prestar especial atención, aunque la experiencia ha demostrado que no es un problema ya que se han transportado piezas de 7000 kg a distancias de 800 km<sup>54</sup> 7000 kg a distancias de 800 km sin problemas (Mag & Rauch, 2011)
2. Instalación en obra: Partiendo siempre de una cimentación bien ejecutada, se coloca una fina capa de mortero de barro que cumpla la función de fijación de las primeras piezas con la base. Los elementos sucesivos se colocan mojando con agua la pieza precedente.
3. Sellado de las juntas: Mediante rociado de agua en las juntas y relleno con la misma tierra.

Las técnicas de prefabricación de tapial, presentan como principales ventajas:

1. La fabricación se realiza sin estar bajo la influencia de las inclemencias meteorológicas.
2. Mejora de los rendimientos de ejecución mediante la mejora de los procesos de producción.
3. Reducción de los tiempos de instalación en obra.
4. Mejora en la planificación de la obra lo que repercute en la reducción de los tiempos de entrega.
5. Mejora de los procesos de control de calidad.



Fotografía 14: Oficinas imprenta Gugler Print&Media

BIBLIOTECA SUBLETTE COUNTY , PINEDALE, WYOMING, EE. UU. (2008) Y NK'MIP  
DESERT INTERPRETIVE CENTER, CANADÁ (2006)

Ambos ejemplos contruidos por la empresa constructora Terra Firma, usando su sistema llamado "Sirewall"

Este sistema, consiste en un tapial estabilizado al que se le incorpora un aislamiento de poliestireno extruido formando un sistema sandwich compuesto por:

Hoja interior de tierra estabilizada de  $e = 25$  cm + aislamiento de poliestireno extruido de  $e = 10$  cm (sujeto mediante barras de acero corrugado) + hoja exterior de tierra estabilizada de  $e = 17.5$  cm

Este sistema combina los beneficios de la masa térmica del muro de tapia con la mejora de los valores de transmitancia que le aporta el aislamiento.



Ilustración 10: Biblioteca Sublette County (sirewall.com)



Ilustración 11: NK'MIP desert interpretive center, Canadá (sirewall.com)

CASA S-LOW. SISTEMA MODULAR CON ENTRAMADO DE MADERA Y TAPIA. (ESTÉVEZ &  
MARTÍN-LARA, 2013)

El sistema S-Low se basa en el sistema americano de entramado de madera Platform Frame, los cerramientos se realizan con muro de tapia o tierra apisonada mientras que la cimentación se ejecuta en hormigón o mampostería de piedra. La estructura de madera cumple una doble función, acabado interior de la vivienda y encofrado. Los muros de tapia cumplen simultáneamente la función de cerramiento, de impermeabilización y de aislamiento.

En cuanto a la cubierta es plana, transitable y ajardinada y se ejecuta con un sistema sencillo de aljibe de Urbanarbolismo© que permite su uso recreativo.



La estructura se construye a partir de escuadrías de madera termo-tratada y paneles estructurales de madera que forman muros y forjados.

Finalizada la cimentación, los módulos se unen entre sí hasta formar muros y forjados, los cuales una vez correctamente escuadrados se unen entre sí.



Fotografía 15: Vista del montaje del prototipo S-low 1 (Estévez & Martín-Lara, 2013)



Fotografía 16: Vista del montaje del prototipo S-low 2 (Estévez & Martín-Lara, 2013)



Fotografía 17: Vista del montaje del prototipo S-low 3 (Estévez & Martín-Lara, 2013)

Una vez ejecutada la estructura de madera de la edificación, se procede a la ejecución de los muros de tapia. Para ello se encofra la cara exterior del muro ya que la propia estructura de madera funciona como encofrado interior perdido. Esto permite que el encofrado exterior se vaya desplazando al tiempo que se levanta el cerramiento. El espesor de la tapia será de 50 cm.

#### Ventajas del sistema

1. La regulación de la humedad que proporcionan los muros de tapia protegen a la madera del ataque de insectos xilófagos y hongos, que necesitan un mínimo de 14-20% de humedad en la madera para actuar. Mantienen el ambiente interior de los espacios en torno al 50% de humedad, garantizando ambientes secos para la madera y en el caso de la estructura de madera en contacto con el muro de tapia, esta se ve protegida gracias al bajo contenido de agua del elemento (4-6 %) así como la capilaridad del tapial.
2. Permite una notable reducción en los tiempos de construcción ya que el sistema permite montar en 4 días una estructura de 150 m<sup>2</sup>
3. El precio de construcción material con este sistema es de 700€/m<sup>2</sup>

#### PARED CALEFACTADA DE TAPIAL PARA UNA SALA DE CONCIERTOS EN LA KAPITELPLATZ, SALZBURG, AUSTRIA (2004)

En este caso se prefabricaron franjas de tapial de 20 m de longitud que posteriormente se cortaron en piezas de 1800 kg para su transporte a obra. Cada uno de los bloques alberga en su interior una instalación de muro radiante, capaz de calentar toda la pared. La puesta en obra se realizó mediante grúas y las juntas se sellaron con mortero de barro para conseguir una apariencia monolítica.



Fotografía 18: Pared calefactada de tapial sala de conciertos en la Kapitelplatz, Salzburg, Austria (Mag & Rauch, 2011)

## 1.2. El ESTUDIO

La diagnosis de patologías en edificios, como las humedades, se compone, como norma general, de las siguientes fases:

- A. Inspección visual y análisis de la documentación
- B. Hipótesis o pre-diagnóstico
- C. Ensayos de comprobación.

En muchos casos, estas patologías pueden resultar engañosas, ya que su apariencia actual puede no guardar relación con el origen de las mismas. Así, grades manchas puede que no sean más que fruto de la condensación higroscópica y los muros no estén evaporando o simplemente residuales; o en el caso contrario que un muro con un aparente correcto estado de conservación esté sometido a humedad, la cual evapora a través de su superficie. Para estos casos se hace necesario recurrir a herramientas complementarias a la inspección visual y prediagnóstico.

El desarrollo de ensayos no destructivos "non-destructive testings" (NDT), otros minimamente destructivos"(minordamage testings (MDT)) y los ensayos de monitorización (monitoring) son actualmente áreas prioritarias de estudio para la conservación de Patrimonio.

### 1.2.1. Métodos operatorios

(Massari, 1959) propuso por primera vez la utilización de termohigrómetros para la medida de las condiciones de humedad y temperatura del aire en los edificios. La limitación de estos estudios radicaba en que sólo confirmaban problemas de condensación, y no humedades del terreno o filtración. Tampoco establecía método instrumental alguno para la medida de la humedad en los materiales constituyentes de muros o suelos, ya que todavía no existía la tecnología para ello.

La humedad presente en los materiales se medía mediante:

- A. Técnicas gravimétricas, es decir, tomar muestras de los materiales, llevarlos al laboratorio, y secarlos, estableciendo el porcentaje de humedad perdido en el secado.

- B. Técnica del carburo de calcio. Estos ensayos son de tipo MDT (mínimamente destructivos, aunque las muestras pueden ser pequeñas), y por lo tanto su utilización es limitada.

Desde entonces, la investigación sobre humedades en los edificios ha seguido dos líneas diferentes:

- A. Monitorización de edificios (Hutton, Enero-feb 1996) mediante termohigrómetros, para analizar la evolución de temperaturas y humedad del ambiente interior, en relación a las variaciones higrotérmicas del aire exterior. Se trata de una línea ampliamente desarrollada como ayuda en la conservación de bienes muebles, museos, ... etc.
- B. Sensores para la medida del contenido en humedad de los materiales "in situ". Esta metodología, aunque todavía en fase de desarrollo, es ampliamente acogida ya que aporta información sobre situaciones reales e "in situ", permitiendo así establecer diseños experimentales tomando como base variables reales. Esta metodología se hace indispensable para el estudio de edificios ya construidos.

Los métodos existentes en la actualidad para la determinación del contenido en humedad de los muros de fábrica, son (Sandrolini & Franconi, 2005):

- A. Métodos directos, tradicionales o gravimétricos: Se trata de la extracción en el edificio de pequeñas muestras de material para su posterior ensayo en laboratorio. Son ensayos considerados del tipo MDT, ya que se trata de muestras pequeñas. Estos métodos, a día de hoy, son los más precisos.
- B. Métodos indirectos:
  - a. Termografía infrarroja, mediante sensores puntuales o mediante cámara IR. Se utiliza desde el año 78. El principal problema de esta técnica es que a veces sólo arroja contenidos de humedad superficiales y, en ocasiones, la influencia del aire húmedo interior puede distorsionar las mediciones.
  - b. Métodos basados en la medida de propiedades eléctricas. Los basados en la medida de la resistencia eléctrica, arrojan resultados mediocres. Los apoyados en la medida de la capacitancia o impedancia, también se ven interferidos por factores superficiales, que distorsionan las lecturas.
  - c. Medida de la humedad relativa en perforaciones abiertas en el muro, de acuerdo a normas de ensayo como la BS 82101 y la BS 53252. Este sistema se basa en la apertura de agujeros en las fábricas, en las que se introducen sondas de temperatura y humedad ambiental. Se trata de establecer correlaciones entre estos parámetros y el contenido en humedad de los materiales, pero los resultados no tienen valor nada más que en el caso de muros en los que el contenido en humedad es ya bajo, no cuando se trata de muros muy mojados.

### **1.3.1. Estudios previos y experiencias de otros autores**

Los textos científicos relacionados con el estudio de los muros de tapia son escasos y en su mayoría están centrados en el análisis de las diferentes soluciones constructivas y/o la caracterización de los materiales empleados, pero no en el análisis del comportamiento térmico



y/o higrotérmico de los mismos. Por ello, a continuación, se muestran las recientes investigaciones experimentales llevadas a cabo por diferentes autores en dicho campo:

Investigaciones experimentales:

#### 1.3.1.1. Analysis of the earth construction's thermal behavior in situ measurements and evaluation of thermal performance of three rammed earth case studies (Sampaio, Gomes, & Borges Abel, 2013)

En Portugal, especialmente en el interior, existen áreas donde se pueden alcanzar fácilmente los 40°C. La elevada inercia térmica que presentan los muros de tierra es responsable del retraso de la conducción de calor a través del muro, contribuyendo así a alcanzar unas temperaturas más suaves en el interior de las viviendas.

En el artículo presentado en Congreso de arquitectura de tierra en Cuenca de Campos 2013, los autores presentaron el resultado del comportamiento térmico de dos campañas llevadas a cabo en tres viviendas diferentes situadas en la región de Abrantes, Portugal realizadas "in situ" durante dos períodos diferentes (verano e invierno).

Para ello, se monitorizó la radiación global vertical, temperatura y humedad ambiente interior y exterior, temperatura interior y exterior en la superficie de los muros y flujo térmico. El comportamiento de los muros fue examinado analizando la evolución del flujo de calor a través de los muros, así como las temperaturas interiores y exteriores con la influencia de la radiación solar.

La zona de estudio, Abrantes, se caracteriza por presentar veranos muy cálidos, con inviernos templados y húmedos.

		Invierno	Verano
CS1	Máx.	23.37	32.3
	Mín.	0.37	8.72
	Media	10	16.76
CS2	Máx.	19.23	41.66
	Mín.	-0.65	12.52
	Media	9.96	23.08
CS3	Máx.	18.61	-

	Mín.	1.81	-
	Media	11.27	-

Tabla 6: Temperaturas exteriores máx., mín. y medias para los tres casos de estudio. Datos procedentes de Hélder Silvano Neves - MeteoAbrantes.

## DISEÑO DEL EXPERIMENTO

Durante la campaña, se instalaron:

- Dos termopares Tipo T para medir la temperatura superficial de los muros ( $T_{se}$  y  $T_{si}$ );
- Un sensor PTC para la medición de las temperaturas ambientales ( $T_e$  y  $T_i$ );
- Dos medidores de flujo de calor sobre las superficies interiores y exteriores del muro;
- Un termohigrómetro para medir la humedad relativa interior y temperatura
- Para la temperatura y humedad exteriores, se utilizaron los datos de la estación meteorológica de Abrantes
- Un pirómetro para medir la radiación global.
- Un data logger NCE 2520-00 Network Control Engine by Metasys® con transmisión remota, el cual fue programado para tomar datos en intervalos de un minuto y recoger el promedio de esos valores cada 10 minutos.

## CASO DE ESTUDIO 1

Situación: Casais de Revelhos, Abrantes, Portugal.

Se monitorizó la fachada principal de la construcción, la cual presenta una orientación sur, sin elementos que puedan ocasionar sombreadamiento

La vivienda, de más de cien años de antigüedad, presenta daños en algunos de sus componentes, debido a una conservación pobre, por lo que la hermeticidad no puede ser asegurada



Fotografía 19: Fachada monitorizada CS1.

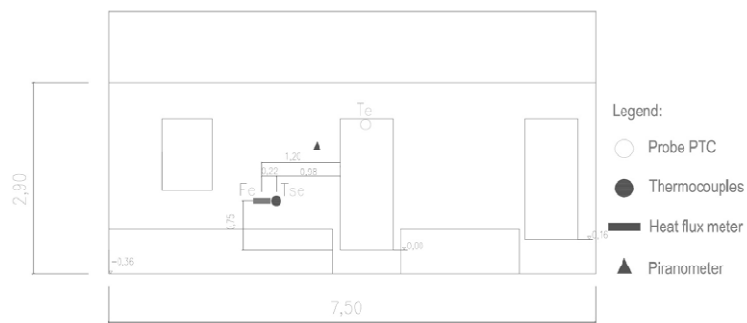


Ilustración 12: Esquema fachada monitorizada CS1.

## CASO DE ESTUDIO 2

Se trata de una vivienda ubicada en Pego, Abrantes, Portugal. Su fachada principal presenta una orientación norte, por lo que la fachada monitorizada fue la de orientación este. Sin embargo, el sensor PTC para la medición de las temperaturas exteriores se instaló cerca de la ventana de la fachada norte para que la radiación solar no influyese en los valores.



Fotografía 20: Fachada monitorizada CS2



Ilustración 13: Ilustración 3: Esquema fachada monitorizada CS2.

### CASO DE ESTUDIO 3

Igualmente localizado en Pego, Abrantes. La fachada monitorizada fue la principal (orientación sur). No existen elementos que produzcan sombreadamiento. En este caso únicamente se llevó a cabo la campaña de invierno.



Fotografía 21: Fachada monitorizada CS3.

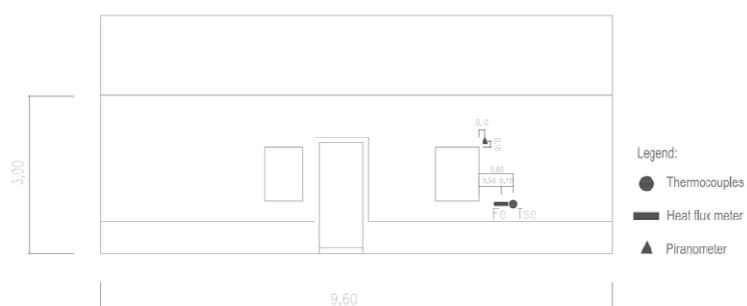


Ilustración 14: Esquema fachada monitorizada CS3.

		CS1	CS2	CS3
Invierno	Comienzo	4 Febr. 12:20	12 Feb. 15:00	8 Marz. 14:10
	Fin	12 Febr. 10:30	8 Marz. 11:20	28 Marz. 12:00
	Duración	7 días, 22 horas y 10 min.	23 días, 20 horas y 20 min.	19 días, 21 horas y 50 min.
Verano	Comienzo	25 May. 12:30	15 Jun. 12:40	-

	Fin	15 Jun. 15:30	4 Jul. 13:00	-
	Duración	21 días, 3 horas	18 días, 22 horas y 20 min.	-

Tabla 7: Períodos de monitorización.

## RESULTADOS OBTENIDOS.

Se presentan los resultados para los días más extremos, es decir, el más cálido del verano y el más frío del invierno para cada una de las viviendas objeto de estudio.

Campaña de invierno:

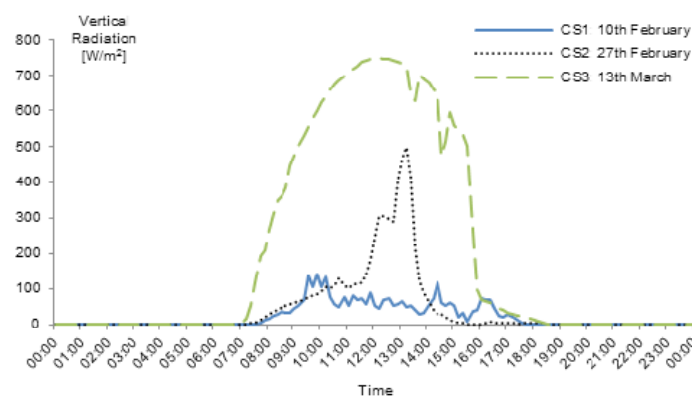


Gráfico 1: Radiación global incidente en el plano vertical de las fachadas monitorizadas. Período de invierno.

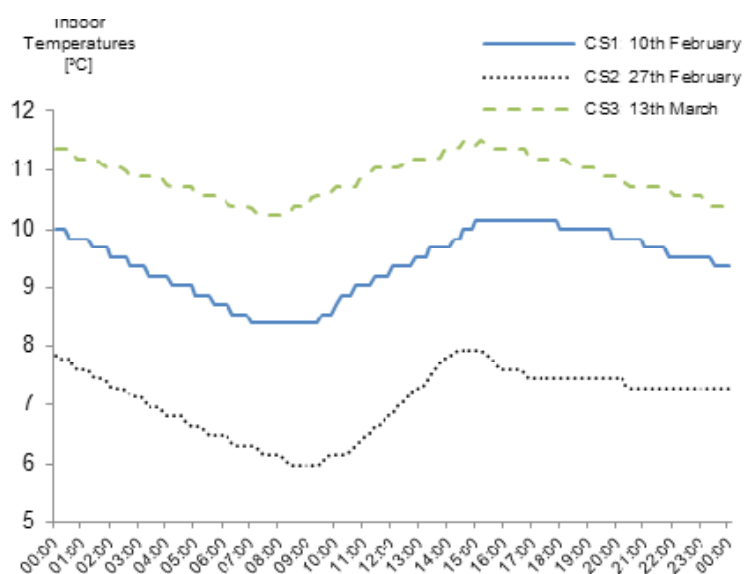


Gráfico 2: Temperaturas interiores. Período invierno.

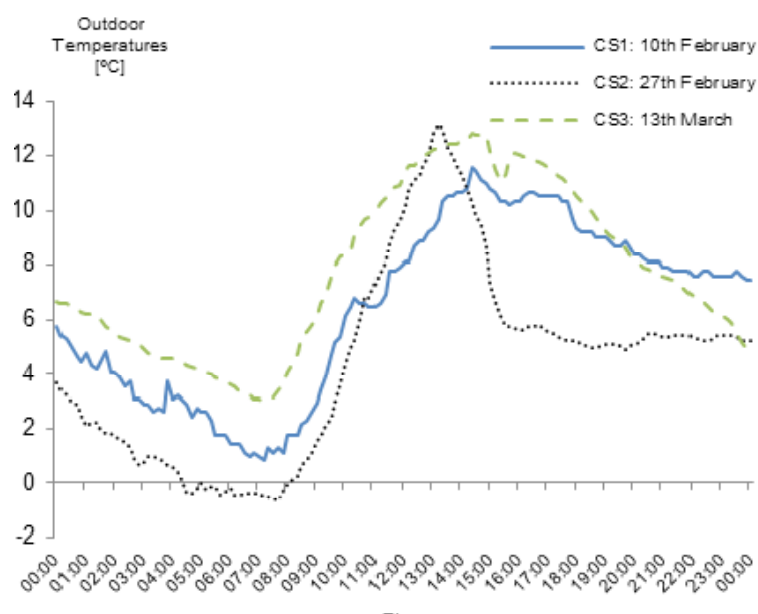


Gráfico 3: Temperaturas exteriores. Período invierno.

De los gráficos obtenidos se puede extraer que, las tres viviendas han estado expuestas a una temperatura exterior similar, incluso si la radiación solar es elevada como en CS3. Las temperaturas máximas exteriores oscilaron entre los 12 y 14 °C, mientras que las mínimas variaron entre los -1 °C y 3 °C. En los tres casos las temperaturas interiores son similares y su variación a lo largo del día es pequeña. Mientras que las temperaturas exteriores sufren una variación de 14 °C, las interiores apenas lo hacen en 2 °C.

El día seleccionado para el CS1, se corresponde con un día nublado, por lo que los valores de radiación son bajos en comparación con los otros dos.

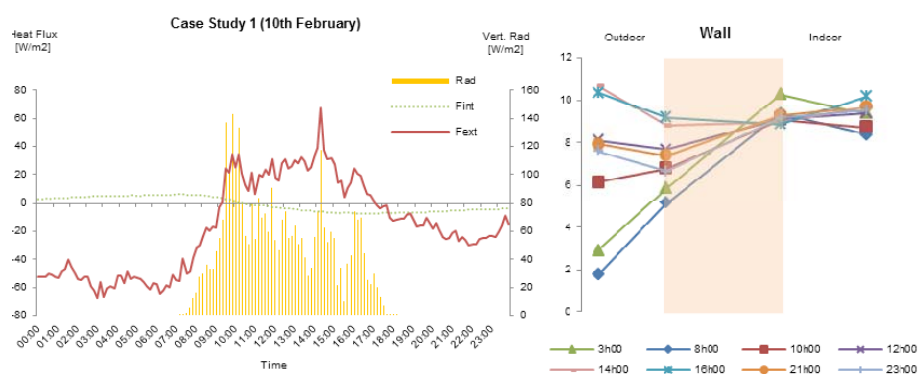


Gráfico 4: Influencia de la radiación solar en el flujo térmico. CS1 período invierno.

En la ilustración adjunta para el CS1, se puede observar cómo el flujo de calor exterior está altamente influenciado por la radiación solar, mientras que el flujo interior presenta valores próximos a cero.

Suponiendo como positivo el flujo de calor cuando toma un sentido exterior-interior, durante las horas de día, el flujo térmico presenta un sentido opuesto al flujo exterior. Por lo tanto, en la

mayoría de los casos, el flujo térmico no presenta una única dirección, lo que significa que acumula calor durante el día.

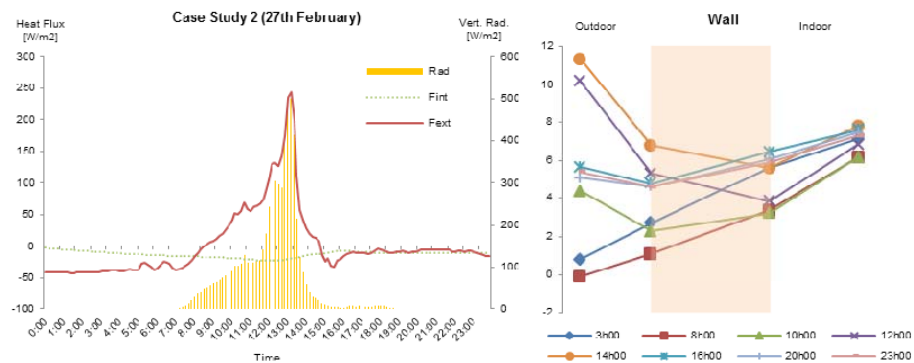


Gráfico 5: Influencia de la radiación solar en el flujo térmico. CS2 período invierno.

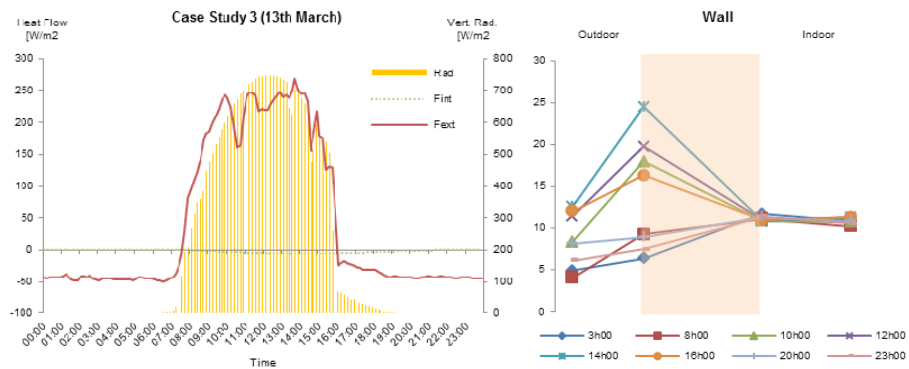


Gráfico 6: Influencia de la radiación solar en el flujo térmico. CS3 período invierno.

En relación a la distribución de temperaturas, se puede apreciar como las temperaturas interiores (superficiales y ambiente) son muy estables en comparación con las exteriores (superficiales del muro y ambientales). Además se observa que las temperaturas superficiales establecen la capacidad calorífica de las construcciones, ya que la temperatura al aire libre siempre tiene la mayor variación.

Campaña de verano:

Durante la campaña de verano, los datos registrados muestran conformidad con las temperaturas exteriores y la radiación solar.



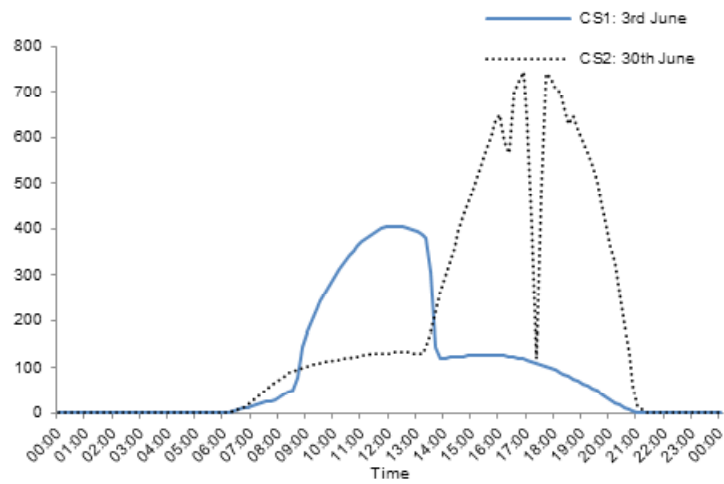


Gráfico 7: Radiación global incidente en el plano vertical de las fachadas monitorizadas. Período de verano.

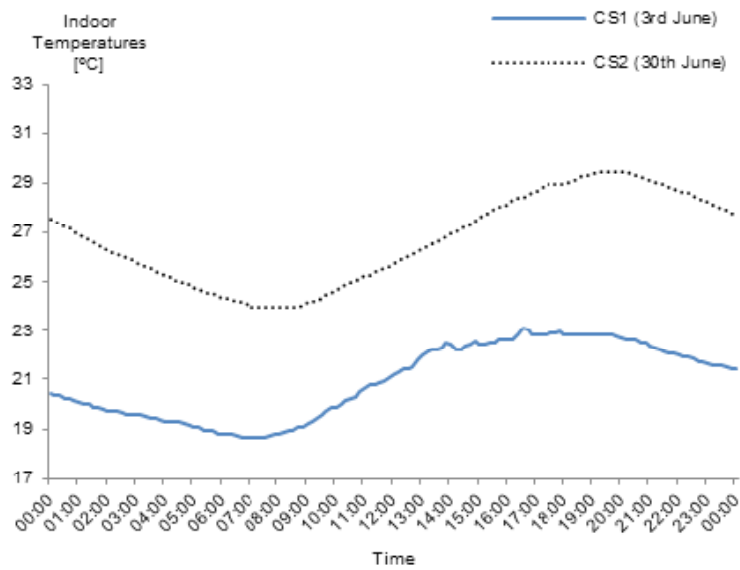


Gráfico 8: Temperaturas interiores. Período verano.

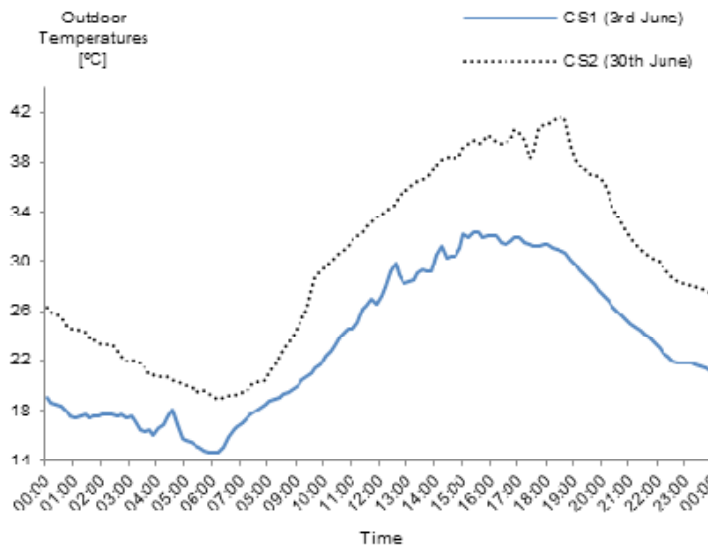


Gráfico 9: Temperaturas exteriores. Período verano.

En la gráfica de temperaturas exteriores adjunta, se puede observar como para el CS2 tanto los valores de radiación como de temperatura son elevados. Esto es debido a la orientación oeste de dicha fachada, lo cual hace que los mayores valores de temperatura sean alcanzados durante la tarde.

También se puede observar en la gráfica de radiación solar incidente como se produce una brusca bajada para el CS1. Esto es debido a una tarde nubosa.

Para esta campaña, los valores máximos para las temperaturas exteriores fueron de 30 °C para el CS1 y de 42 °C para el CS2. las mínimas fueron DE 14 °C Y 20 °C respectivamente. Esto significa que se produce una variación exterior de temperaturas de 22 °C para el CS2.

Una vez más, las temperaturas interiores se muestran bastante estables en comparación con las externas.

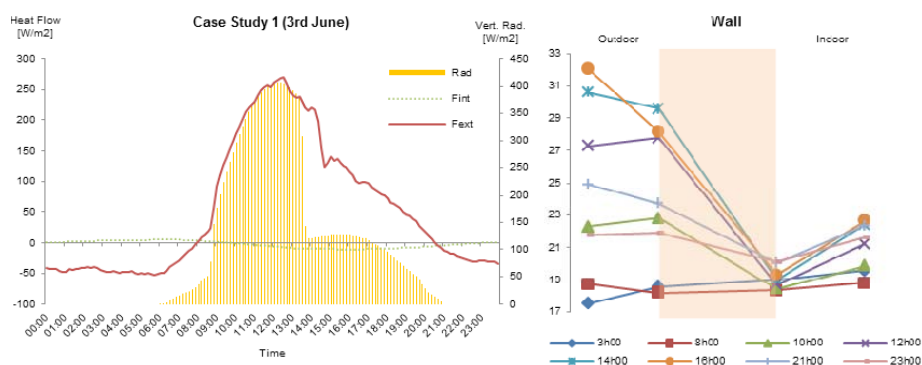


Gráfico 10: Influencia de la radiación solar en el flujo térmico. CS1 período verano.

La figura anterior muestra los elevados valores de flujo exterior (con dirección exterior-interior) claramente influenciados por la radiación solar. Al igual que durante la campaña de invierno, el flujo de calor interior es prácticamente nulo, lo cual indica que la radiación solar es absorbida y el calor acumulado en los muros durante el día.

Como se puede apreciar en la figura anterior, la superficie interior del muro apenas presenta variación, a pesar de que la temperatura interior si varía. De ello podemos extraer la conclusión de que la variación de la temperatura interior es consecuencia de la conducción de calor a través de techos, puertas y ventanas.

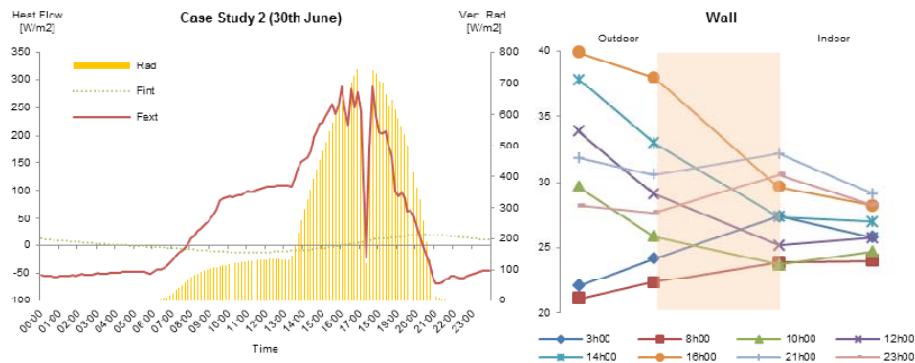


Gráfico 11: Influencia de la radiación solar en el flujo térmico. CS2 período verano.

Si observamos las gráficas para el CS2, alrededor de las 17:30, el valor de radiación solar descende abruptamente. Como consecuencia, el valor del flujo exterior alcanza valores negativos.

En relación a la variación de temperaturas se observa una elevada variación para los valores exteriores. Existe una caída considerable entre los valores máximos interiores y exteriores. Así, para el CS2 se puede apreciar como el valor máximo de temperatura exterior es alcanzado a las 16:00 mientras que para el interior el valor máximo se alcanza a las 21:00.

## CONCLUSIONES:

Como conclusiones del presente estudio se puede extraer:

Durante la campaña de invierno, no es posible alcanzar condiciones de confort térmico interior.

Por el contrario, durante la campaña de verano, el comportamiento térmico de las construcciones de tierra es muy satisfactorio.

A pesar de elevadas variaciones térmicas exteriores durante la campaña de verano, las variaciones térmicas interiores son moderadas.

El flujo térmico exterior está altamente influenciado por la radiación solar.

Existe un considerable retraso entre los valores máximos de las temperaturas internas y externas, lo cual es debido a la elevada inercia térmica del elemento.

Los resultados experimentales del estudio revelan la elevada inercia térmica de los muros, lo que llevó a bajas temperaturas interiores en ambas campañas.

Los resultados demuestran que es necesario mejorar la conductividad térmica de la tierra para alcanzar los requerimientos mínimos impuestos por la normativa de edificación.

### 1.3.1.2. Comportamiento termodinámico de muros de BTC en función del clima (Cavero & Jové, 2013)

El presente estudio se llevó a cabo en el Laboratorio de Construcciones Arquitectónicas de la ETSA Valladolid y se centra en el análisis de las propiedades térmicas de los BTC o bloques de tierra comprimida, los cuales, debido a sus características, se puede asimilar a un muro de tapia a pequeña escala.

La investigación se desarrolló de acuerdo a dos fases:

1. Construcción y calibrado de caja térmica. Ensayos en laboratorio para obtener las características térmicas del material conforme ISO 8990:1994.
2. Simulación informática del comportamiento térmico del BTC

Para el caso de los BTC, existe una normativa de referencia de reciente publicación, la UNE 41410:2008 Bloques De Tierra Comprimida Para Muros y Tabiques. Definiciones, Especificaciones y Métodos De Ensayo. Madrid: , 2008.

Si se realiza la búsqueda de los valores térmicos de los bloques de tierra comprimida en la norma, esta remite a una norma internacional, la UNE-EN 1745. Esta norma es de aplicación a piezas de albañilería cerámica y de hormigón y a piedra natural, pero no hace ninguna referencia explícita a las fábricas de tierra cruda. Si se opta por no adoptar los valores presentados en esta norma, nos posibilita el recurso a los documentos normativos en los que se encuentran recogidos los procedimientos experimentales para la obtención de las propiedades térmicas de los materiales.

Si se escoge adoptar los valores del CTE<sup>24</sup>, existe un único epígrafe dentro del catálogo de elementos constructivos que engloba a los BTCs, muros de tierra comprimida y adobes, con un valor de conductividad común de  $1,1 \text{ W/m}^2\text{°C}$  y no se define el valor del calor específico, aunque se supone de  $1.000 \text{ J/kg}^{\circ}\text{C}$  (la misma que para hormigones, piezas cerámicas, yesos y derivados)

El Instituto de Arquitectura en Tierra de la UNESCO, distingue entre dos clases de bloques:

- Tipo A, de mayor resistencia mecánica y una conductividad entre  $0,46$  y  $0,81 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ ,
- Tipo B, de menos resistencia con una conductividad entre  $0,81$  y  $0,93 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ .

La DIN-4108-4 alemana, mantienen una relación lineal entre la densidad de las piezas de albañilería y su resistencia térmica, situándose esta entre  $0,6$  y  $1,2 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$  para condiciones de humedad en torno al 75%, y hasta un 60% menores en materiales completamente secos.

#### ENSAYO EN LABORATORIO SEGÚN ISO 8990:1997 PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD EN RÉGIMEN ESTACIONARIO DE UN MURO DE BTC

El ensayo se realizó a pequeña escala.

El material elegido para la realización de la caja de ensayos es el panel sándwich de la marca “Thermochip ®” THA. Este panel según el DITE 08/295 tiene una transmitancia de  $0,325 \text{ W/m}^2\text{°C}$  (Ua). Las dimensiones de la misma fueron de 90.8 cm de altura, 80.8 cm de anchura y una profundidad de 55 cm.

---

<sup>24</sup> Código Técnico de la Edificación.

Una vez montada la caja en el laboratorio, se determina el factor de pérdidas del sistema, cerrando la caja con un panel de idénticas características al de la construcción de la misma para posteriormente colocar:

- Dos termopares en cada cara del panel (marca Ahlborn), conectados a una central de registro de datos Almeno/2390-5.
- El registro de datos se programa cada diez minutos.
- Se realiza toma de datos de la temperatura y humedad ambientales en el momento del ensayo.
- Duración del ensayo: último fin de semana de Julio.

Se conecta una bombilla de 40 W como fuente de calor conocida y se comienza con el registro y sellado de la caja dejándolo en funcionamiento hasta alcanzar el flujo de calor estacionario.

Para la medición de los valores correspondientes a un muro de BTC, se procede a la construcción del mismo en el interior de la caja, quitando la tapa frontal. Dichos BTC se reciben con mortero de barro de igual composición a la de los bloques (determinada en laboratorio mediante un ensayo anterior). Una vez terminado se deja secar 24 h para eliminar el exceso de agua absorbida durante la construcción para posteriormente proceder a la instrumentalización del mismo con la misma configuración que la empleada para en ensayo de determinación de pérdidas de la caja.

La duración para los dos ensayos indicados fue de 3 días.

Resultados:

El ensayo correspondiente a la calibración de la caja arrojó unas diferencias de temperatura realmente notables, las cuales llegaron a ser de hasta 40 °C una vez alcanzado el régimen estacionario. La temperatura exterior se mantuvo constante en unos  $25 \pm 1$  °C, sin embargo, la temperatura superficial interior llegó a registrar 73.8 °C una vez alcanzado el estado estacionario.

Conociendo esta diferencia de temperaturas, podemos aplicar la ecuación 1 para determinar las pérdidas de calor asociadas a la composición de la caja:

$$\text{Ecuación 1: } Q_c = Q_w - [U_a \cdot (t_{s1a} - t_{s2a}) \cdot S_a]$$

$$Q_c = 40 - [0.325 \cdot (73.8) \cdot 1.415]$$

$$Q_c = 6.06 \text{ W}$$

Siendo,

$Q_w$  : la potencia de la fuente de calor. En este caso, 40 W.

$t_{s1a} - t_{s2a}$  : la diferencia entre las temperaturas superficiales interiores y exteriores.

$S_a$  . superficie interior de la caja.

Una vez obtenido el valor de pérdida del sistema  $Q_c$ , se procede a ensayar el cerramiento.

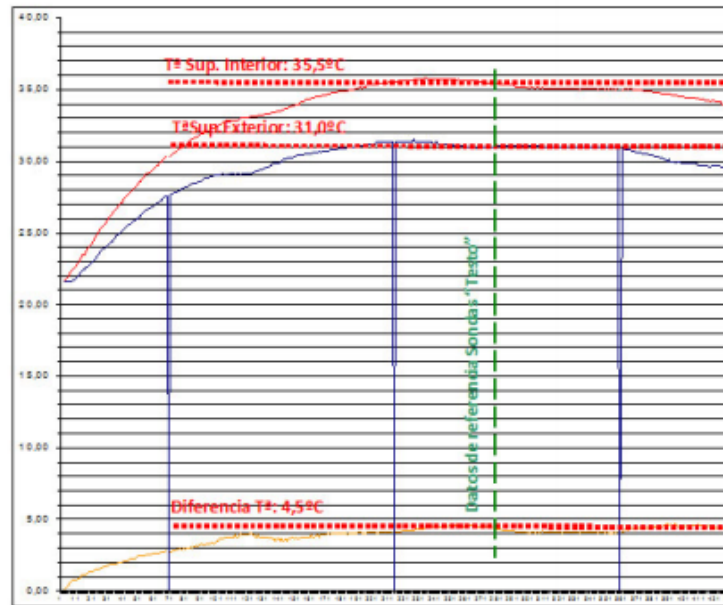


Gráfico 12: Valores obtenidos por las sondas de temperatura superficial situadas en las distintas caras del muro. (Cavero & Jové, 2013)

La ilustración 28 nos muestra que las diferencias de temperatura registradas entre ambas caras del muro es de 4.5 °C mientras que la diferencia de temperatura entre las caras del Thermochip fue de 20.7 °C.

De los datos recogidos por las sondas Testo, también se puede extraer la humedad relativa. Llama la atención los altos valores de humedad relativa en la superficie interior del muro BTC. Esto no es más que la consecuencia directa del escaso tiempo de secado que tuvo el elemento después de su construcción y previo al ensayo (24 horas).

Con la aplicación de la ecuación 2, obtenemos el valor de conductividad térmica para el elemento ensayado.

$$\text{Ecuación 2: } \lambda_b = [e_b / (t_{s1b} - t_{s2b}) * S_b] * [Q_w - U_a (t_{sa1} - t_{sa2}) * S_a - Q_c]$$

$$\lambda_b = [0.1 / (4.5) * 0.3575] * [40 - 0.325 (20.7) * 1.1279 - 6.06]$$

$$\lambda_b = 0.9188 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$$

Este valor debe ser corregido en función del contenido de humedad de la muestra. Para ello se aproxima la cantidad de agua que absorbió el muro durante su construcción una vez conocido el volumen de agua utilizado para realizar el mortero de barro (= 0.8 l), por lo que el incremento de humedad en el muro con respecto a su humedad de equilibrio fue de 0.011 kg/kg. Aplicando la fórmula para una conductividad corregida de la UNE-EN ISO 10456, se obtiene un valor corregido de:

$$\text{Ecuación 3: } \lambda'_b = \lambda_b * e^{fu(u_2 - u_1)}$$

$$\lambda'_b = 0.9188 \text{ W/m } ^\circ\text{C} * 0.9569$$

$$\lambda'_b = 0.8792 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$$

## ESTUDIO ENERGÉTICO DE MUROS DE TIERRA

A fin de determinar los valores de demanda energética asociada a distintos tipos de cerramiento según la zonificación climática establecida en el CTE, se realiza el siguiente estudio energético, relacionando el comportamiento térmico del edificio con variables tanto propias como ajenas al mismo. El motor de cálculo escogido para la realización de este estudio es el Energy-Plus con las siguientes consideraciones:

- A. Con el objetivo de estudiar el consumo energético asociado a los cerramientos, nos centraremos en la influencia de las variables de transmitancia y capacidad calorífica.
- B. Se opta por estudiar exclusivamente los cerramientos verticales opacos, situados perimetralmente a un espacio cuadrado de 10x10m y de 3,5 m de altura que se llamará “caja gris”.
- C. Los muros se orientan cada uno a un punto cardinal, de manera que al tener la misma superficie, la influencia energética conjunta de los cuatro muros se pueda considerar un valor medio independiente de la orientación.
- D. El resto de variables del programa se establecen para que no tengan ninguna influencia en la transferencia térmica de los muros.
- E. La temperatura de consigna se fija en 22,5°C todo el año.

Con estas pautas establecidas, se procede a la simulación de cuatro tipos de cerramientos:

### Características de los cerramientos estudiados

**Tipo 1:** a base de bloques de tierra comprimida recibidos con mortero de barro de 40cm de espesor

**Tipo 2.** Cannabric (bloques de tierra comprimida estabilizados a base de cal y fibras de cáñamo.

**Tipo 3.** aplacado exterior de junta abierta, una cámara de aire muy ventilada, tablero impermeable de partículas con cemento de 1cm, 6 cm de aislamiento de conductividad 0,04 W/m°C, y una placa de yeso laminado de 1cm al interior.

**Tipo 4.** Como fachada convencional (de exterior a interior): ½ pie de ladrillo perforado caravista, aislamiento de conductividad 0,04 W/m°C y 4,8cm de espesor, tabicón de ladrillo hueco doble de 7cm y enlucido de yeso de 1,5cm al interior..

Por último se definen cinco cerramientos ficticios, uno por cada una de las zonas climáticas de invierno recogidas en el documento de limitación de la demanda energética del código técnico de la edificación. Estos cerramientos tienen la misma transmitancia que la límite establecida para cada una de las citadas zonas en el referido documento, y ninguna característica de inercia térmica.

	Espesor	Transmitancia U		Capacidad calorífica	
	M	W/m <sup>2</sup> °C	%	KJ/ m <sup>2</sup> °C	%
BTC_lab	0.40	1.600	100.00	419.00	100.00
BTC_solo_U	0.40	1.600	100.00	-	-

BTC_cañamo	0.30	0.572	35.75	122.43	29.22
Ligero	0.15	0.572	35.75	8.25	1.97
Convencional	0.25	0.572	35.75	82.35	19.65
Ulim zona E		0.570	35.63		
Ulim zona D		0.600	41.25		
Ulim zona C		0.730	45.63		
Ulim zona B		0.820	51.25		
Ulim zona A		0.940	58.75		

Tabla 8: Características térmicas cerramientos estudiados (Cavero & Jové, 2013)

Con las 65 simulaciones realizadas, se obtuvieron datos para la demanda energética anual, mensual, diaria e incluso horaria.

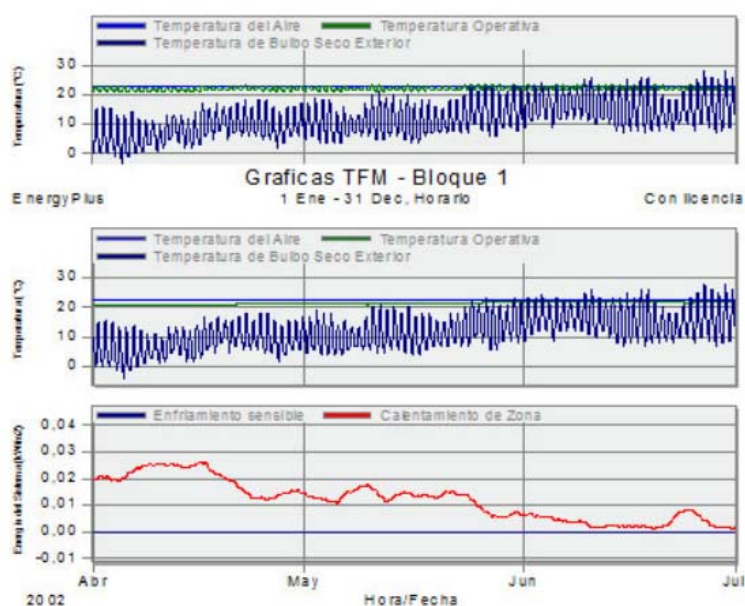


Gráfico 13: Variación de la demanda para el muro BTC\_lab (abajo) y fachada ligera (arriba). (Cavero & Jové, 2013)

A la vista de los gráficos de la ilustración 29, cabe destacar como para un mismo período, la solución ligera sufre continuas variaciones en la demanda energética a diferencia de los valores del BTC\_lab mucho más estables no sufriendo en ningún caso demanda de calefacción y refrigeración en un mismo día.



Demanda Calefacción	BTC_Lab		Ligero		Convencional		BTC_Cañamo		U límite	
	kWh/m2	%	kWh/m2	%	kWh/m2	%	kWh/m2	%	kWh/m2	%
E1 (León)	146,20		68,39	46,8	80,85	41,6	59,94	41,0	69,35	47,4
D3 (Madrid)	106,25		50,46	47,5	44,11	41,5	43,68	41,1	56,85	55,4
D2 (Valladolid)	131,38		63,00	48,0	54,69	41,6	53,87	41,0	73,26	55,8
D1 (Palencia)	132,28		62,40	47,2	55,09	41,6	54,33	41,1	72,49	54,8
C4 (Cáceres)	81,90		41,89	51,1	34,70	42,4	34,07	41,6	53,79	65,7
C3 (Granada)	90,24		48,41	53,6	38,39	42,5	37,58	41,6	62,28	69,0
C2 (Barcelona)	80,74	100,0	41,08	51,0	34,34	42,5	33,65	41,7	53,61	66,4
C1 (A Coruña)	94,38		46,74	49,5	40,56	43,0	39,54	41,9	59,65	63,2
B4 (Sevilla)	51,94		31,76	61,1	22,50	43,3	21,94	42,2	45,87	88,3
B3 (Valencia)	62,99		35,67	56,6	27,20	43,2	26,55	42,1	51,24	81,3
A4 (Almería)	40,18		26,91	67,0	18,22	45,3	17,36	43,2	44,04	109,8
A3 (Tenerife)	2,93		13,59	463,8	2,88	99,3	1,56	53,2	24,36	831,4
A3 (Cádiz)	84,29		36,96	43,8	35,22	41,8	34,98	41,5	59,51	70,8

Tabla 9: Demanda de calefacción. (Cavero & Jové, 2013)

Tras analizar los datos de las demandas energéticas de la tabla 7, se puede observar que la demanda energética generada por el cerramiento BTC\_lab es siempre superior a la del resto de las soluciones constructivas objeto de estudio.

También se puede apreciar como las diferencias en la demanda entre las soluciones BTC\_lab y Ligero se reducen a medida que los inviernos se hacen más suaves.

Demanda Refrigeración	BTC_Lab		Ligero		Convencional		BTC_Cañamo		U límite	
	kWh/m2	%	kWh/m2	%	kWh/m2	%	kWh/m2	%	kWh/m2	%
E1 (León)	4,23		10,06	237,8	2,76	65,2	1,88	44,4	10,76	254,4
D3 (Madrid)	19,47		15,44	79,3	8,83	45,4	8,26	42,4	18,49	95,0
D2 (Valladolid)	9,99		13,62	136,3	5,29	53,0	4,35	43,5	16,49	165,1
D1 (Palencia)	7,35		11,31	153,9	4,03	54,8	3,26	44,4	13,75	187,1
C4 (Cáceres)	31,43		21,23	67,5	13,74	43,7	13,09	41,6	27,61	87,8
C3 (Granada)	22,62		20,21	89,7	10,23	45,4	9,41	41,8	26,64	118,3
C2 (Barcelona)	15,35	100,0	14,73	96,0	7,25	47,2	6,57	42,8	19,52	127,2
C1 (A Coruña)	1,19		7,72	648,7	1,61	135,3	0,75	63,0	10,51	883,2
B4 (Sevilla)	40,87		27,14	66,4	17,56	43,0	16,86	41,3	39,20	95,9
B3 (Valencia)	22,70		18,94	83,4	10,30	45,4	9,62	42,4	27,69	122,0
A4 (Almería)	34,33		24,19	70,5	15,20	44,3	14,39	41,9	39,53	115,1
A3 (Tenerife)	45,10		32,10	71,2	20,43	45,3	18,86	41,8	53,44	119,5
A3 (Cádiz)	13,14		7,37	56,1	5,63	42,1	5,54	42,2	13,30	101,2

Tabla 10: Demanda refrigeración. (Cavero & Jové, 2013)

En cuanto a las demandas de refrigeración, la influencia de la capacidad calorífica del muro frente a los valores de transmitancia se pone de manifiesto. En las regiones con temperaturas veraniegas moderadas, los BTC consiguen mejores resultados que las soluciones ligeras y en casi toda las regiones reduce la demanda de los valores del edificio de referencia, con los valores límites de transmitancia.

Demanda Total	BTC_Lab		Ligero		Convencional		BTC_Cañamo		U límite	
	kWh/m2	%	kWh/m2	%	kWh/m2	%	kWh/m2	%	kWh/m2	%
E1 (León)	150,43		78,45	52,2	83,61	42,3	61,82	41,1	80,11	53,3
D3 (Madrid)	125,72		65,90	52,4	52,94	42,1	51,94	41,3	77,34	61,5
D2 (Valladolid)	141,37		76,62	54,2	59,98	42,4	58,22	41,2	89,75	63,5
D1 (Palencia)	139,63		73,71	52,8	59,12	42,3	57,59	41,2	86,24	61,8
C4 (Cáceres)	113,33		63,12	55,7	48,44	42,7	47,16	41,6	81,40	71,8
C3 (Granada)	112,76		68,62	60,9	48,62	43,1	46,99	41,7	88,92	78,9
C2 (Barcelona)	96,09	100,0	56,41	58,7	41,59	43,3	40,22	41,9	73,13	76,1
C1 (A Coruña)	95,57		54,46	57,0	42,17	44,1	40,29	42,2	70,16	73,4
B4 (Sevilla)	92,81		58,90	63,5	40,06	43,2	38,80	41,8	85,07	91,7
B3 (Valencia)	85,69		54,61	63,7	37,50	43,8	36,17	42,2	78,93	92,1
A4 (Almería)	74,51		51,10	68,6	33,42	44,9	31,75	42,6	83,57	112,2
A3 (Tenerife)	48,03		45,69	95,1	23,31	48,5	20,42	42,5	77,80	162,0
A3 (Cádiz)	97,43		44,33	45,5	40,75	41,8	40,52	41,6	72,81	74,7

Tabla 11: Demanda anual. (Cavero & Jové, 2013)

Sin embargo, una vez realizado el cómputo anual de la demanda, se puede extraer que los ahorros que se producen en refrigeración no son significativos frente a los de calefacción

El muro BTC estabilizado es el que mejor comportamiento presenta para todos los climas y los valores de la demanda se encuentran siempre muy por debajo de los valores de los cerramiento

con transmitancias límites según zona del HE1. Esto pone de manifiesto que un material pueda encontrarse por debajo de los valores límite de demanda energética sin cumplir los valores límite de transmitancia.

### 1.3.1.3. Metodología de inspección higrotérmica para la determinación de un factor intensidad de evaporación en edificios históricos (García Morales, López González, & Collado Gómez, 2012)

El documento presenta una metodología de "inspección higrotérmica" para determinar la existencia o no de flujos de agua a través de los distintos elementos constructivos mediante un termohigrómetro digital de lectura directa TESTO 610, el cual registra la temperatura, humedad relativa y punto de rocío del aire.

<b>Tipo de sonda: NTC</b>	
Exactitud	$\pm 0.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Resolución	$0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$
<b>Tipo de sonda Sensor de humedad, capacitivo</b>	
Exactitud	$\pm 2.5 \text{ \% HR (+5 ... +95 \%HR)}$
Resolución	$0.1 \text{ \%HR}$

Esta metodología de inspección puede resultar eficaz a la hora de realizar diagnósticos de humedades en edificios históricos, en los casos en los que una inspección de los daños no resulte suficiente para aproximarse a un diagnóstico.

#### METODOLOGÍA:

Las lecturas se realizan apoyando la sonda sobre la superficie sobre el que se desea tomar la lectura, esperando el tiempo adecuado para que la lectura se estabilice, tomando nota entonces de la temperatura y grado de humedad del aire en contacto con ese paramento en el punto seleccionado.

Las lecturas deben tomarse siguiendo una metodología que permita su posterior análisis estadístico.

Se determinan una serie de hipótesis previas para establecer la forma de tomar las lecturas, clasificándolas de tal manera que permitan realizar el posterior análisis estadístico. Las hipótesis de partida son:

- A. Si se trata de un edificio húmedo, el contenido de humedad en el interior será superior a la humedad exterior.
- B. Cuanto mayor es la humedad en una estancia, más próximo se encuentra el foco que la produce.
- C. Cuando el aire existente en una sala, en contacto directo con un paramento o suelo, contiene más humedad que el ambiente, ese elemento está evaporando.
- D. A mayor proximidad del foco de evaporación, mayor es el contenido de humedad.

Variables de observación que se ajustan a las hipótesis anteriores:

- 1. Variable ambiente (lecturas tipo a): interior y exterior.
- 2. Variable altura: en cm sobre la cota del suelo.
- 3. Variable posición: en cuatro niveles.
- 4. Punto situado en el centro de una sala o recinto.
  - a. Punto situado sobre la solera (tipo "s").
  - b. Punto en la arista entre suelo y pared (tipo "sp").
  - c. Punto sobre la pared (tipo "p").
  - d. Variable material: es decir, el material sobre el cual tomamos las lecturas (yeso, cemento, madera, ... )

Estas variables pueden ser cumplimentadas con cualquier otra que se considere necesaria ya que puede afectar a la humedad del edificio, basándose en las hipótesis de inspección, como por ejemplo la orientación del elemento constructivo, el análisis de varias salas, etc.

Una vez establecidas hipótesis y variable, se inicia el procedimiento de inspección.

Se parte del conocimiento del contenido de humedad del ambiente exterior, a 1.00 m sobre el nivel del suelo (lecturas tipo a). Este valor sirve como punto de partida para el análisis de las lecturas interiores.

Una vez determinada la humedad relativa exterior, se procede de la misma forma para determinar el contenido de humedad ambiente interior, es decir, a 1.00 m. sobre el nivel de la solera. El número de lecturas interiores dependerá del tamaño del edificio, siendo al menos de una lectura por cada estancia. En caso de que se desee analizar la estratificación del aire húmedo, se tomarán además lecturas a diferentes alturas.

Una vez caracterizado el ambiente interior, se toman las lecturas tipo "s", "sp" y "p", es decir, sobre el suelo, en la arista entre suelo y pared y sobre la pared. Estas lecturas se toman apoyando la sonda sobre cada uno de los elementos a analizar. Al igual que para la determinación del contenido de humedad ambiente interior, el número de lecturas depende del tamaño del edificio o del número de focos a determinar

Esta metodología de registro, presenta una precisión de 0.5 g/kg.

Análisis de resultados:

Los registros anteriores se anotan en tablas "tipo" como la que sigue:

Hora	°	T (°C)	W (g/kg)	Variables				Otros
				A	B (cm)	C	D	
10:00	1	15.2	4.65	Int	100	"a"	Ladrillo	
	2	15.4	6.28	Int	1	"sp"	Mortero	
	3	15.3	4.75	Int	20	"p"	agujero	

Tabla 12: Tabla de registro termohigrómetro. (Metodología de inspección higrotérmica para la determinación de un factor intensidad de evaporación en edificios históricos, 2012)

Una vez anotados todos los registros, se procede al análisis estadístico de los resultados, considerando como umbral de referencia el ambiente exterior.

Cabe mencionar que las lecturas tomadas, deben ser realizadas el mismo día, ya que las condiciones exteriores de temperatura y humedad, valores de referencia para el análisis, son cambiantes.

El análisis se efectúa mediante gráficos de comparación de temperatura y humedad, obteniendo así una nube de puntos cuyos valores máximos son indicativos de la intensidad de evaporación media en el edificio, expresando así el "Factor de Intensidad máximo de evaporación" como la diferencia del valor máximo de la nube de puntos y el valor de referencia (lectura exterior).

$$Fi_{\max} = Wi_{\max} - We \text{ (en g/kg)}$$

Siendo:

$Fi_{\max}$  : Factor de intensidad máximo de evaporación.

$Wi_{\max}$  : Valor máximo del grado de humedad en el interior.

$We$  : Valor de referencia exterior del grado de humedad.

Un foco de evaporación se considera significativo cuando  $Wi_{\max} - We > 1 \text{ g/kg}$ .

Si la inspección higrotérmica se realiza en días húmedos, suele ocurrir que  $We > Wi_{\max}$ . En estos casos se debe recurrir a un  $Fi_{\max}$  "coregido" que permita realizar una clasificación de los niveles de intensidad de los focos como sigue:

$$Fi_{\max} = Wi_{\max} - Wi_{\min} \text{ (en g/kg)}$$

Si se realiza una cartografía de los focos, indicando los niveles de intensidad sobre los distintos planos del edificio, permitirá avanzar en el pre diagnóstico como sigue:

- A. Si se detectan focos de evaporación a lo largo de la arista de encuentro entre el suelo y el cerramiento, es decir el contenido de humedad es mayor a lo largo de la arista que en el ambiente interior de la estancia, posiblemente se trate de una humedad procedente del terreno.

- B. Si existen indicios de que en un cerramiento puedan existir humedades por filtraciones de agua de lluvia del exterior, deberemos analizar las lecturas tipo "s" y "sp" para detectar si la evaporación se produce con mayor intensidad a cotas superiores.
- C. Sin embargo, si se detectan focos de evaporación más intensos en el suelo que en la arista de encuentro con el paramento, el prediagnóstico nos lleva hacia humedades procedentes de averías internas del edificio como puede ser el caso de pozos.

Cabe destacar que el Factor de Intensidad de evaporación de los edificios será cambiante a lo largo del año, así en invierno los edificios evaporarán poco por lo que los factores de evaporación serán bajos, mientras que en primavera-verano evaporarán con mayor facilidad resultando más sencilla la identificación de dichos focos.

Como aspectos negativos de la inspección higrotérmica podemos señalar:

- No cuantifica el caudal de evaporación, simplemente es una aproximación al comportamiento higrotérmico global.
- Se trata de una metodología "artesanal" ya que se realiza con instrumentos que requieren lectura manual.

El presente trabajo concluye con la presentación de 7 casos de estudios realizados en varios edificios históricos, alguno de los cuales se presentan a continuación de forma ilustrativa

#### CS 1 y 2: Iglesia Santa María la Nueva (Zamora) e Iglesia Santa María de Horta (Zamora)

Fecha toma datos: 10 julio 2010 (mañ)

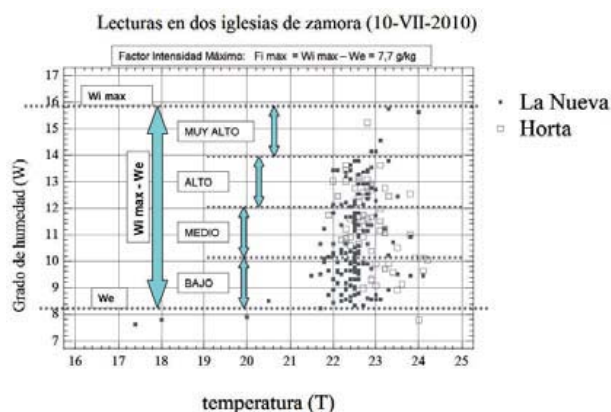
We = 8.1 g/kg<sup>25</sup>

Temperatura: 22 - 24 °C (ambas)

Fi max = 7.7 g/kg (ambas)

Se realiza estratificación en 4 niveles, según tabla.

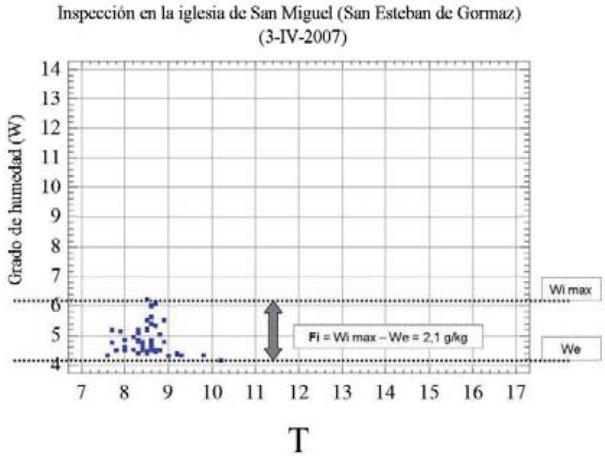
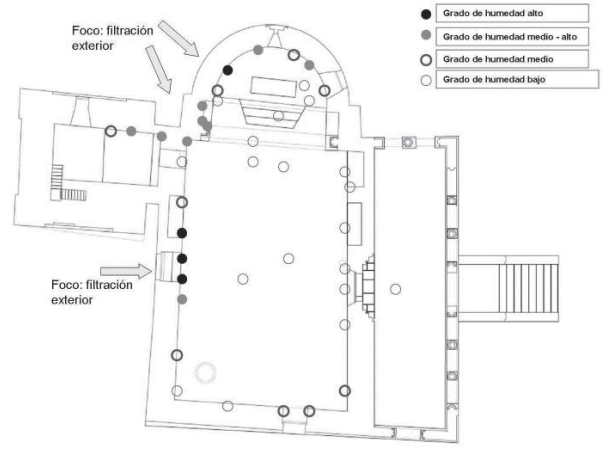
Dichos niveles se presentan sobre el plano del edificio y este plano es el que se utiliza para realizar el prediagnóstico.



Foco intensidad	Puntos en los que se cumple que...
Bajo	$0 < (Wi - We) < (Wi \text{ max} - We)/4$
Medio	$(Wi \text{ max} - We)/4 < (Wi - We) < 2(Wi \text{ max} - We)/4$
Alto	$2(Wi \text{ max} - We)/4 < (Wi - We) < 3(Wi \text{ max} - We)/4$

<sup>25</sup>El valor se ha tomado como medio, ya que el grado de humedad varió ligeramente de la mañana a la tarde.

	Muy alto	$3(Wi \max - We)/4 < (Wi - We) < (Wi \max - We)$
--	----------	--

<b>CS 3: Iglesia de San Miguel (San Esteban de Gormaz, Soria)</b>											
<p>Fecha toma datos: 3 abril 2007</p> <p><math>We = 4.1 \text{ g/kg}</math></p> <p>Temperatura: 22 - 24 °C (ambas)</p> <p><math>Fi \max = 2.1 \text{ g/kg}</math> (ambas)</p> <p>Se realiza estratificación en 4 niveles, según tabla.</p> <p>Si comparamos el <math>Fi \max</math> con el estudiado para los dos casos anteriores, observaremos que aquí es mucho menor, lo cual indica que la edificación presenta focos de evaporación muchos más pequeños.</p> <p>Al realizar la estratificación por niveles, se puede apreciar en el plano la ubicación de los focos, resultando en este caso un prediagnóstico relativamente sencillo ya que coinciden con zonas de riesgo de filtración del exterior.</p>	<p>Inspección en la iglesia de San Miguel (San Esteban de Gormaz) (3-IV-2007)</p>  <table border="1"> <thead> <tr> <th>Foco intensidad</th><th>Puntos en los que se cumple que...</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Bajo</td><td><math>0 &lt; (Wi - We) &lt; (Wi \max - We)/4</math></td></tr> <tr> <td>Medio</td><td><math>(Wi \max - We)/4 &lt; (Wi - We) &lt; 2(Wi \max - We)/4</math></td></tr> <tr> <td>Alto</td><td><math>2(Wi \max - We)/4 &lt; (Wi - We) &lt; 3(Wi \max - We)/4</math></td></tr> <tr> <td>Muy alto</td><td><math>3(Wi \max - We)/4 &lt; (Wi - We) &lt; (Wi \max - We)</math></td></tr> </tbody> </table> 	Foco intensidad	Puntos en los que se cumple que...	Bajo	$0 < (Wi - We) < (Wi \max - We)/4$	Medio	$(Wi \max - We)/4 < (Wi - We) < 2(Wi \max - We)/4$	Alto	$2(Wi \max - We)/4 < (Wi - We) < 3(Wi \max - We)/4$	Muy alto	$3(Wi \max - We)/4 < (Wi - We) < (Wi \max - We)$
Foco intensidad	Puntos en los que se cumple que...										
Bajo	$0 < (Wi - We) < (Wi \max - We)/4$										
Medio	$(Wi \max - We)/4 < (Wi - We) < 2(Wi \max - We)/4$										
Alto	$2(Wi \max - We)/4 < (Wi - We) < 3(Wi \max - We)/4$										
Muy alto	$3(Wi \max - We)/4 < (Wi - We) < (Wi \max - We)$										

#### 1.3.1.4. The thermal performance of earth buildings (Heathcote, 2011)

Este artículo examina la base teórica del comportamiento térmico de las paredes de tierra y la relaciona con varios resultados de los test realizados sobre tres edificios construidos por el autor, y con su comportamiento previsto utilizando un programa de modelado por ordenador. El estudio experimental se ubica en Australia.

Todos los edificios ensayados, son iguales, a excepción de los cerramientos de fachada. Se trata de construcciones de 4m<sup>2</sup> en planta, sobre solera de hormigón y cubierta metálica con aislamiento. Los edificios no fueron diseñados bajo los principios de construcción pasiva.

CS1. Cerramiento de ladrillo con estructura de madera interior de 90 mm, placas de yeso de 10 mm de espesor con aislamiento de 1.5 m<sup>2</sup>K/W, cámara de 40 mm y cerramiento exterior a base de ladrillo de arcilla cocida de 110 mm. El espesor total del cerramiento es de 250 mm.

CS2. Cerramiento ejecutado con adobes, estabilizados con betún y con un espesor de 250 mm.

Aunque hubo alguna fuga de aire a través de la puerta, estas se mantuvieron cerradas durante los test para minimizar el intercambio de aire. La puerta acristalada fue el único elemento acristalado de la edificación la cual, a pesar de estar situada hacia el norte, presenta una pendiente suficiente para estar protegida del sol del verano.

Los edificios no fueron diseñados teniendo en cuenta aspectos de funcionamiento pasivo ya que este tipo de construcción son particulares de todo tipo de construcción, no sólo de las construcciones de tierra. El propósito principal de este estudio no es justificar el diseño pasivo, sino demostrar la efectividad de los muros de tierra en la moderación del flujo de calor hacia dentro y hacia fuera de los edificios.

Los valores de conductividad térmica para los muros de tierra son difíciles de encontrar.

#### COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL EDIFICIO

En estado estacionario, existen ganancias solares a través de los acristalamientos, así como flujo térmico hacia el interior de la edificación a través del suelo, muros y tejado. Flujo de calor hacia el exterior a través del suelo y fábricas, así como a través del intercambio por ventilación.

Por lo tanto:  $Q_{sg} + Q_{cw} + Q_{cr} + = Q_{cf} + Q_{cg} + Q_v$

El cálculo se realiza según la siguiente ecuación:

$$Q_{cw} = A * (T_{solair} - T_{si}) / R$$

donde:

$Q_{cw}$  = Conducción de flujo de calor en estado estacionario a través del muro.

$A$  = Área del cerramiento (m<sup>2</sup>)

$T_{solair}$  = Temperatura Sol-Air de superficies exteriores. Es la temperatura exterior modificada (incrementada) por el efecto de la radiación solar en las superficies. El incremento es igual al impacto de la irradiación solar, la absorción solar de la superficie exterior del muro, la resistencia superficial exterior (la cual depende de la velocidad del viento)

$T_{si}$  = Temperatura superficial interior.

R = Resistencia térmica del muro en estado estacionario, incluyendo la resistencia superficial interior y exterior.

Los resultados mostrados en la siguiente tabla, se corresponden con el análisis realizado en las dos edificaciones objeto de estudio, el 9 de Enero de 2007 con una temperatura promedio exterior de 23.6 °C.

	<b>CS1. Cerramiento de ladrillo (+R1.5 aislante)</b>	<b>CS2. Muro de barro</b>
	Flujo térmico (Wattios) - Sentido positivo	
Ganancia solar puerta ( $Q_{sg}$ )	57	57
Muros ( $Q_{cw}$ )	33	91
Cubierta ( $Q_{cr}$ )	8	2
Ventilación ( $Q_v$ )	-18	-28
Suelo ( $Q_{cf}$ )	-53	-81
Door fabric ( $Q_{cg}$ )	-27	-41
Promedio de temperaturas interiores previstas	25.7 °C	26.9 °C
Promedio de temperaturas interiores medidas	25.4 °C	26.6 °C

**Tabla 13:** Promedio analítico de flujo térmico y temperaturas. Verano.

En la tabla se puede observar como el método de la admitancia proporciona un buen indicador de la temperatura media interior en verano y en esta situación, la resistencia térmica en estado estacionario es el factor determinante, siendo:

$$R_{CS1} = 2.04 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$R_{CS2} = 0.47 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Esta diferencia queda patente en el promedio de flujo térmico a través de los cerramientos, pero la elevada temperatura interior en el muro de adobe causa un mayor flujo térmico de salida a través de la puerta.

Las variaciones en las temperaturas sobre el promedio son determinadas mediante fluctuaciones en la temperatura de conducción sobre la media, teniendo en cuenta cualquier retraso asociado con una forma de construcción particular. Usando la Guía CIBSE:

$$\text{Variación de la temperatura interior} = \text{Variación de la ganancia solar interna} / \sum A * Y$$

Siendo:



A: área de la superficie interna (m<sup>2</sup>)

Y: Admitancia de superficie<sup>26</sup> (W / m<sup>2</sup> K)

Para los muros de tierra la admitancia de superficies se determina más o menos por el interior del muro 100 mm y por lo tanto, no varía significativamente con el espesor del muro. Sin embargo, es significativamente mayor que otras formas de construcción como un muro de ladrillo aislado y por lo tanto debería, teóricamente, tener un efecto moderado en la oscilación de la temperatura.

La variación en las ganancias solares se calcula como sigue:

$$Q = Q_{sg} + Q_{cw} + Q_{cr} + Q_{cf} + Q_{cg} + Q_v$$

Para calcular la oscilación en el flujo térmico a través del muro (Q<sub>cw</sub>):

$$Q_{cw} = A * (T_{solag} - T_{si}) / R_{ciclica}$$

donde:

Q<sub>cw</sub> = Conducción de flujo de calor en estado estacionario a través del muro.

A = Área del cerramiento (m<sup>2</sup>)

T<sub>solag</sub> = Temperatura Sol-Air de exterior a las t<sub>lag</sub> horas previas a la hora considerada (° K).

t<sub>lag</sub> = Tiempo de retraso de la onda térmica debido al espesor del material.

T<sub>si</sub> = Temperatura superficial interior.

R<sub>ciclica</sub> = Resistencia térmica cíclica del muro en m<sup>2</sup>K / W. R<sub>ciclica</sub> es igual a R en estado estacionario dividida por el factor de decremento.

	<b>CS1. Cerramiento de ladrillo (+R1.5 aislante)</b>	<b>CS2. Muro de barro</b>
	Flujo térmico (Wattios) - Sentido positivo	
Muros $\tilde{Q}_{cw}$	55	204
Ganancia solar puerta $\tilde{Q}_{sg}$	23	23
Cubierta $\tilde{Q}_{cr}$	47	37
Ventilación $\tilde{Q}_v$	49	24
Suelo $\tilde{Q}_{cf}$	0	0
Door fabric $\tilde{Q}_{cg}$	44	53

<sup>26</sup>La admitancia de superficie es la tasa de flujo de calor entre las superficies internas de la estructura y la temperatura ambiental en el espacio, para cada grado de desviación de esta temperatura sobre su valor medio.

Ganancia solar total $\tilde{Q}$	218	307
$\sum A \cdot Y$	175	388
Oscilación prevista de temperaturas	1.2 °C	0.9 °C

Tabla 14: Promedio analítico de flujo térmico y oscilación temperaturas. Verano.

En la tabla adjunta se muestran los resultados para los ejemplos analizados por el autor. En este ejemplo,  $R_{CS1ciclica} = 2.65 \text{ m}^2\text{K/W}$  mientras que  $R_{CS2ciclica} = 1.15 \text{ m}^2\text{K/W}$ . Esto explica el "muy superior" flujo de calor a través de las paredes de adobe.

La tabla muestra también como la oscilación térmica estimada para el muro de adobe fue menor que para el muro de ladrillo debido a que la variación de la ganancia térmica en la pared de adobe es elevada, la admitancia del muro de adobe es casi el doble que en el muro de ladrillo.

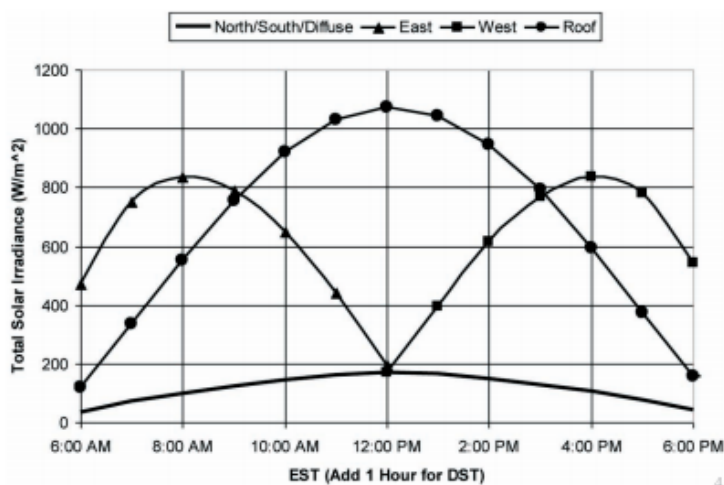


Gráfico 14: Irradiancia solar total.

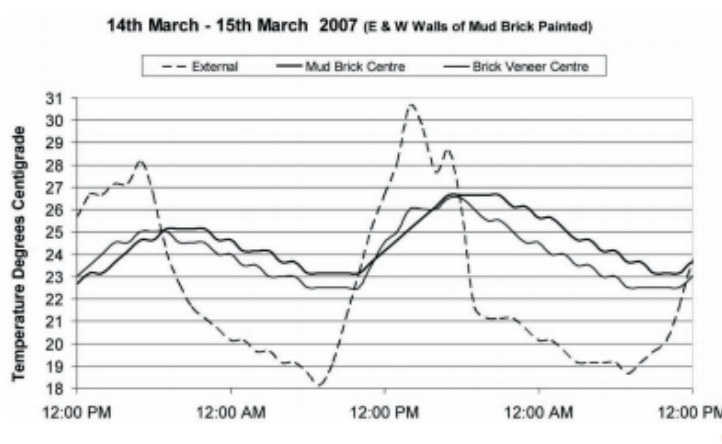


Gráfico 15: Gráfico variación temperaturas 14 y 15 Marzo 2007.

La variación de temperaturas registradas en Marzo de 2007 para el muro de adobe fue de alrededor 2 °C mientras que para el cerramiento de ladrillo fue de 1.75 °C. El promedio de temperaturas para la edificación con cerramiento de adobe durante este período, y con las fachadas este y oeste pintadas con un color claro, fue solamente de alrededor 0.5 °C superior que el edificio con cerramiento de ladrillo.

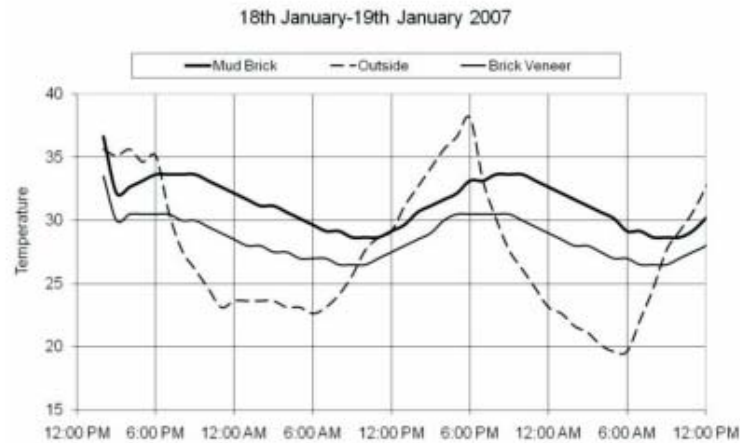


Gráfico 16: Gráfico variación temperaturas 18 y 19 Enero 2007.

Cabe destacar que, previo al pintado de las fachadas este y oeste del cerramiento de adobes, la temperatura promedio era significativamente superior (por encima de 3 °C) que en el caso del edificio con cerramiento de ladrillo, aunque las oscilaciones eran similares. Estas dos mismas edificaciones, fueron analizadas utilizando AccuRate Program desarrollado por CSIRO en Australia, con las fachadas este y oeste tanto pintadas como sin pintar, con los siguiente resultado:

	<b>Promedio mensual de temperaturas (Fachadas E y O pintadas)</b>	<b>Rango diario típico</b>	<b>Desfase temperatura (horas) / Tiempo de desfase solar aproximado</b>	<b>Promedio mensual más medio rango °C</b>
Muros con aislamiento R1.5	25.2	3.5	4/1 pm	27.0
Muro de adobe e = 250 mm	27.1 (25.5)	4.0	8/9 am	29.1 (27.5)
Muro de adobe e = 450 mm	26.4 (25.1)	0.5	14/3 am	26.7 (25.4)

Muro de adobe e = 600 mm	26.1 (24.9)	1.0	19/10 pm	26.6 (25.4)
-----------------------------	----------------	-----	----------	----------------

Tabla 15: Predicción de temperaturas utilizando AccuRate Program

## INVIERNO

Durante el invierno, cuando las temperaturas exteriores son relativamente bajas existe una pequeña ganancia a través de muros y cubierta, pero el principal conductor de las temperaturas interiores es la ganancia solar a través de los acristalamientos. Cabría esperar que en ausencia de calefacción la temperatura interior estaría por encima de la temperatura exterior, pero todavía significativamente por debajo de los niveles de confort aceptados. Esto se ilustra en la figura siguiente, en la cual para los edificios ensayados, el promedio de temperaturas para el edificio con cerramiento de ladrillo y aislamiento es de 18.5 °C, siendo 1 °C superior al edificio con cerramiento de adobe. El promedio de temperaturas exteriores estuvo en torno a los 13 °C.

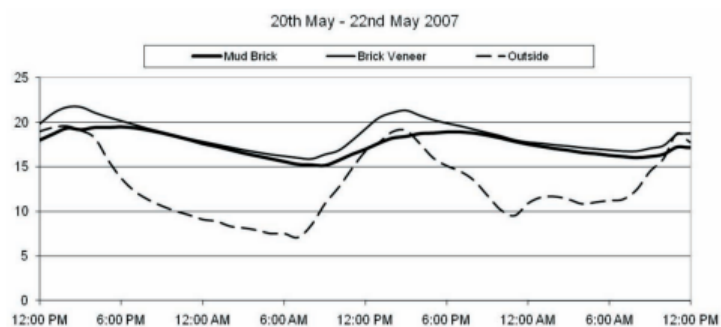


Gráfico 17: Variación temperaturas 20 y 22 Mayo 2007.

Cuando se añade la calefacción a fin de alcanzar una temperatura interior aceptable, unos 20 °C, las pérdidas a través de los muros hacia el exterior es controlada por la resistencia en estado estacionario de los muros y la energía requerida para mantener el interior con una temperatura constante es por lo tanto referida con la resistencia térmica en estado estacionario de la envolvente del edificio. En el caso de los edificios objeto de estudio, la resistencia térmica en estado estacionario para el muro de adobes es casi la mitad que para el edificio con cerramiento de ladrillo y aislamiento por lo que la energía necesaria para mantener una temperatura constante es casi el doble.

Los dos edificios fueron nuevamente simulados con el mismo software para observar el efecto de aumentar el tamaño de los acristalamientos orientados al norte. La siguiente figura muestra La Figura 9 muestra la energía de calefacción arrojada por el programa para mantener los edificios dentro de la comodidad de condiciones de invierno (aproximadamente 23 °C) para las condiciones actuales (con una puerta acristalada de unos 1.6 m2) y para un acristalamiento tres veces superior.

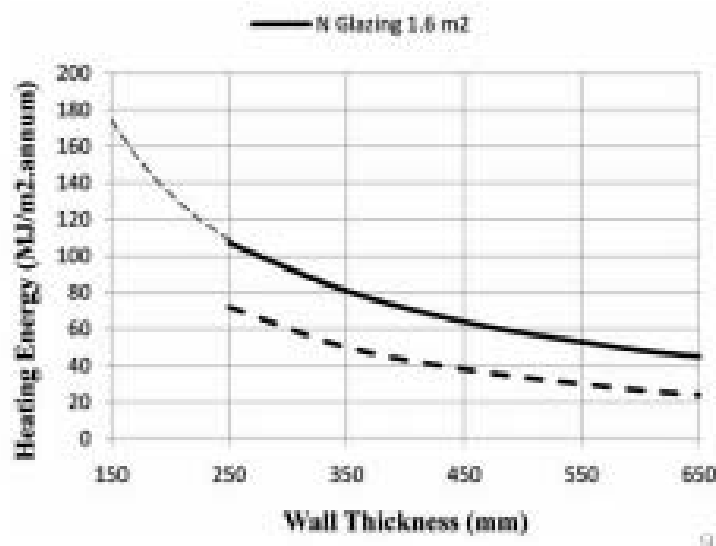


Gráfico 18: Gráfico de simulación con incremento del aislamiento norte.

Esto muestra que, la energía de calefacción requerida es inversamente proporcional al espesor de los muros, pero que incrementando el área acristalada al triple, la energía de calefacción se reduce prácticamente a la mitad.

## CONCLUSIONES

Los muros de tierra presentan una pobre resistencia térmica en estado estacionario, aunque esta se ve linealmente incrementada con el espesor, aunque todavía es relativamente baja para muros de espesor 600 mm. Esto significa que, en verano, el promedio de temperaturas será generalmente alto y en invierno se requerirá de mayor calefacción para mantener un promedio de temperaturas por encima de los niveles de confort. Ambos efectos pueden ser aliviados con un buen diseño pasivo (por ejemplo, el sombreado, paredes de color claro, etc.) y buen uso del edificio (por ejemplo, ventilación, cerrar las cortinas, etc.).

Durante el verano, los muros de tierra moderan el paso de calor a través de los mismos, pero esta moderación sólo es significativa para muros con espesores elevados. La resistencia térmica cíclica de los muros de tierra aumenta exponencialmente con espesor y para cerramientos de espesor mayor que 450 mm tiene el efecto de nivelar casi totalmente oscilaciones de temperatura externa.

En ausencia de grandes áreas acristaladas orientadas al norte y masa térmica interna, para mejorar el comportamiento térmico en invierno sería necesario aislamiento o muros de espesor superior a los 450 mm. Otra opción para mejorar el comportamiento de los cerramientos de poco espesor, sería la introducción de una lámina de poliestireno en el centro del muro. Un muro de adobe de 250 mm de espesor presenta una resistencia térmica en estado estacionario equivalente a la del muro de ladrillo con aislamiento de R 1.5 en la cámara. Aun que también presenta una elevada resistencia térmica cíclica.

Las fachadas con colores claros reducen la temperatura sol-air significativamente durante el verano y según el autor, esto fue suficiente para mitigar la baja resistencia térmica en estado estacionario de los cerramientos, de tal forma que el comportamiento del cerramiento de adobe con las fachadas exteriores pintadas fue solo marginalmente inferior al del cerramiento de ladrillo con aislamiento.

El rendimiento térmico de muros de tierra no puede ser aislado del resto del edificio, y en particular para hablar de inercia térmica como si se aplica a la totalidad edificio es engañoso. Las propiedades térmicas del techo y el suelo son muy importantes como es la existencia / inexistencia de interior masa térmica, lo que puede no ser necesariamente de tierra.

#### 1.3.1.5. Viability of rammed earth building construction in cold climates(Fix, y otros, 2009)

El siguiente estudio se centra en el análisis de la viabilidad de la construcción de muros de tierra apisonada en climas fríos como el Canadiense.

Los inviernos en la provincias de Alberta, Saskatchewan y Manitoba son los más largos y fríos de Canadá, por lo que toda envolvente de las edificaciones debe poseer un excelente control sobre la transmisión de calor.

Generalmente, las construcciones de tierra apisonada poseen una baja resistencia a la transmisión de calor, del orden de 0.8 - 1 W/m K. Este valor depende de la densidad específica y del contenido de humedad. En general, la conductividad térmica se incrementa con la densidad, al igual que la resistencia a compresión. Por lo tanto, se puede establecer una relación entre el comportamiento térmico y la resistencia estructural. A medida que aumenta el contenido de humedad, también lo hace la conductividad térmica, la capacidad calorífica y por lo tanto la masa térmica. Por ejemplo, un muro con un 60% de saturación de agua tiene una conductividad de 1.5 W/m K, un 50% superior a la de mismo muro cuando está seco (Hall, 2008)

La resistencia térmica de los muros de tierra apisonada no es suficiente por si sola para un edificio situado en clima frío como el caso del Canadiense, por ello debe acompañarse de aislamiento térmico para alcanzar una resistencia térmica mayor.

#### EL EFECTO DE LA MASA TÉRMICA

Esta baja resistencia térmica de los muros de tierra apisonada se contrarresta con el efecto de la masa térmica. Este efecto permite a los muros absorber calor durante períodos cálidos para cederlo al ambiente durante el siguiente período más frío.

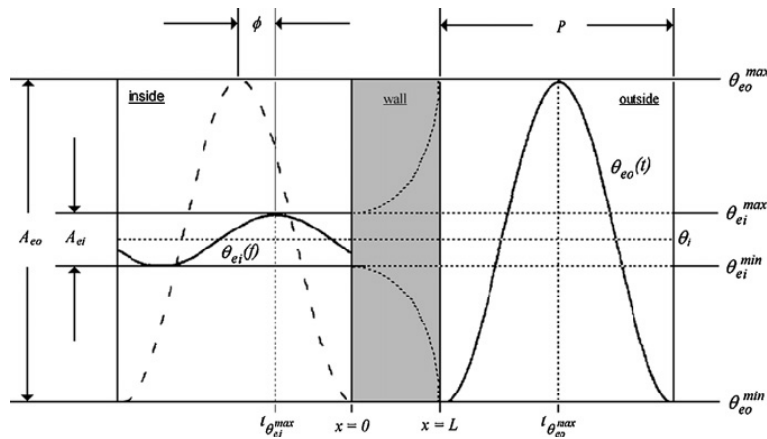


Gráfico 19: Explicación visual del efecto de transmisión de la masa térmica. (Hall, 2008)

Este comportamiento explica el prolífico uso de las construcciones con tierra apisonada en zonas como Nuevo México, donde el promedio de temperaturas a lo largo del año es de 12 °C, y la temperatura media mensual oscila desde 1 °C hasta 21 °C. Durante el invierno, la temperatura diaria varía desde los -7 °C hasta los 5 °C, mientras que durante el verano oscila desde los 14 °C hasta los 28 °C (National Oceanic and Atmospheric Administration, 2002). Por lo tanto, en Nuevo México una vivienda ejecutada con muros masivos y no acondicionada mantendría unas temperaturas interiores desde 1 °C a 21 °C a lo largo de todo el año, ignorando las ganancias solares. Si lo comparamos con una vivienda que no posea masa térmica, el rango de temperaturas variaría entre los -7 °C hasta los 28 °C, ignorando las ganancias solares igualmente.

Aquí es importante diferenciar entre una envolvente termalmente masiva y una edificación con masa térmica interna. Una edificación con masa térmica interna puede igualmente mitigar la fluctuación interna de las temperaturas, pero sólo a través del almacenamiento de las ganancias solares que penetren a través de las ventanas. Una envolvente masiva, regula dichas fluctuaciones de temperatura a través de la captura y almacenaje de calor del aire ambiente, incluso en la ausencia de ganancias solares. La adición de radiación solar simplemente incrementa el promedio de temperaturas interiores a lo largo de todo el año.

La masa térmica sólo es efectiva en la normalización de las temperaturas internas cuando es expuesta no sólo a una fuente de energía externa, sino también al ambiente interior.

Teniendo todo esto en cuenta, el diseño del tamaño de los acristalamientos tiene un efecto opuesto para cada uno de los casos. Si aumentamos el tamaño de las ventanas aumentaremos la exposición a radiación solar de toda masa térmica interna mientras disminuimos la superficie de envolvente térmica masiva. Un diseño solar pasivo debe centrarse en el uso de la masa térmica interna para aprovechar las ganancias solares, con acristalamientos orientados al sur y dimensionadas de tal forma que estas ganancias superan o equilibran la pérdida en la eficiencia de la envolvente. El diseño de viviendas con tierra apisonada debería centrarse menos en las ganancias solares y más en la exposición de la superficie.

La decisión de que estilo de diseño es más acertado, es difícil y depende de las condiciones climáticas.

En resumen, una envolvente ejecutada con tierra apisonada puede almacenar calor de dos fuentes independientes: el ambiente interior y la radiación solar.

Estudios muestran que el máximo efecto de la masa térmica se produce con muros de tierra apisonada de espesor 200 mm (Hall, 2008). Muros de mayor espesor no producen un incremento de la masa térmica debido a que los ciclos de fluctuación de las temperaturas son de 24 h.

## CLIMA FRÍO Y MASA TÉRMICA

En las provincias de las praderas de Canadá, las condiciones climáticas difieren mucho de las de Nuevo México, así el promedio de temperaturas a lo largo del año es de 2.6 °C, y la temperatura media diaria oscila desde -13°C hasta 16 °C. Durante el invierno, la temperatura diaria varía desde los -18 °C hasta los -8 °C en Enero, mientras que durante el verano oscila desde los 10 °C hasta los 22 °C (Canada's National Climate Archives, 2002). Con estos datos, una envolvente de tierra apisonada sólo ayudaría a reducir las cargas de energía para calefacción, ya que durante el verano no es necesario refrigeración.

Una envolvente compuesta de tierra apisonada y un aislamiento rígido puede proporcionar una solución con baja conductividad térmica y alta masa térmica.

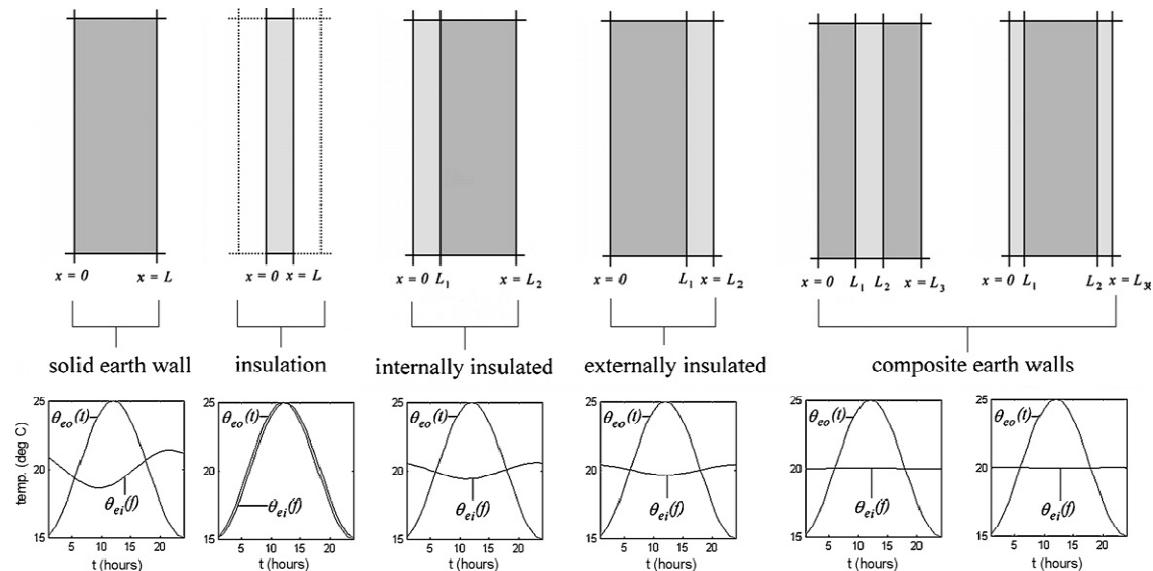


Ilustración 15: Comportamiento térmico de cerramientos compuestos de tierra apisonada y aislamiento a base de poliestireno. (Hall, 2008)

El estudio de Hall demostró que la posición del aislamiento ubicación no afecta al efecto de masa térmica de la pared. Aplicó una variación sinusoidal de temperaturas desde los 15 °C hasta los 25 °C en la cara exterior de cada una de las composiciones estudiadas, y después midió la correspondiente variación de la temperatura interior.

El cerramiento de tierra apisonada amortigua la fluctuación externa de 5 °C hasta una fluctuación de 2°C sobre el promedio de 20 °C.

El comportamiento de muro sólido de poliestireno, el cual tiene un reducido efecto en la señal debido a su pequeña masa térmica.



En el caso de cerramiento de tierra apisonada aislados interna o externamente se observa que aumentan la amortiguación de la señal con respecto al primer caso, manteniendo la temperatura interna dentro de una fracción de 1 °C.

Para el caso de los "muros de tierra composite" proporcionan un incremento del efecto de la masa térmica sobre los demás, manteniendo la temperatura interior constante en 20 °C.

En resumen, aislando un cerramiento de tierra apisonada conseguiremos no sólo mejorar su resistencia térmica, sino también mejorar el efecto de la masa térmica.

## HERMETICIDAD

En general, los edificios contruidos con tierra apisonada poseen una excelente calidad del aire interior. Esto es debido a que se componen únicamente de arcilla, limo, arena y agua. Es importante confirmar que la tierra con la que se pretende construir se encuentre libre de cualquier tipo de contaminante procedente de un uso anterior de la misma.

Igualmente, estas edificaciones deben poseer una aberturas para ventilación adecuadas, ya que pueden llegar a ser muy herméticas.

A pesar de que los muros de tapia no proporciona ninguna fuente de alimento para el crecimiento de moho , las condiciones interiores deben mantenerse lo suficientemente secas como para que el moho no puede crecer en otros medios.

## CONTROL DE LA HUMEDAD

Como para cualquier tipo de edificación, el control de la humedad es de suma importancia. La humedad puede entrar en el edificio de tres formas diferentes: en forma líquida a través de aberturas existentes en la envolvente, por capilaridad si se trata de materiales porosos o en forma de vapor de agua por difusión.

Asumiendo que la envolvente se encuentra lo suficientemente sellada como para garantizar que la penetración de agua líquida a través de aberturas es imposible, la capilaridad y difusión del vapor de agua deben ser controladas.

En climas fríos, como el de las praderas de Canadá las envolvente de los edificios se rematan con materiales no porosos como los revestimientos vinílicos o estucos para controlar las infiltraciones por capilaridad y barreras de vapor internas para controlar la difusión de vapor de agua.



## CAPÍTULO 2: FUNDAMENTOS TEÓRICOS.

### 2.1. CALOR Y TEMPERATURA

El **calor** es una forma de energía contenida en las sustancias como el movimiento molecular o como radiación electromagnética en el espacio. La energía es la capacidad para hacer un trabajo por lo que sus unidades son las mismas, es decir  $\text{N} \cdot \text{m} = \text{J}$  (Julio).

La **temperatura** es el síntoma de la presencia de calor en un cuerpo o sustancia. La escala Celsius se basa en el agua, tomando como punto  $0^\circ\text{C}$  el punto de congelación del agua y  $100^\circ\text{C}$  el punto de ebullición (a presión atmosférica normal) La escala Kelvin comienza en el cero absoluto, es decir, la ausencia total de calor. Por lo tanto  $0^\circ\text{C} = 273.15\text{ K}$

El **calor específico** conecta entre sí los conceptos de calor y temperatura ya que se define como la cantidad de energía necesaria para elevar la temperatura de una sustancia por unidad de masa en un grado centígrado. Se mide en  $\text{J} / \text{kg K}$ . Esta magnitud es diferente para cada tipo de material, así para los metales varía entre 100 y  $800\text{ J} / \text{kg K}$ , para materiales de albañilería como hormigón o ladrillos oscila en torno a los  $1200\text{ J} / \text{kg K}$  y para el agua (que tiene el mayor valor entre las sustancias) alcanza los  $4176\text{ J} / \text{kg K}$ .

El **calor latente** de una sustancia es la cantidad de calor (energía) absorbida por unidad de masa de la sustancia en un cambio de estado (de sólido a líquido o de líquido a gas) sin ningún cambio en la temperatura. Se mide en  $\text{J} / \text{kg}$ . Si tomamos el ejemplo del agua:

- El calor latente de fusión (de hielo a agua) a  $0^\circ\text{C} = 335\text{ KJ} / \text{kg}$
- El calor latente de evaporación a  $100^\circ\text{C} = 2261\text{ KJ} / \text{kg}$

La **termodinámica** es la ciencia que estudia el flujo de calor y su relación con el trabajo mecánico.

La **primera ley de la termodinámica o principio de conservación de la energía** dice que la energía no puede ser creada o destruida (excepto en procesos subatómicos), sino que simplemente se transforma. Trabajo y energía son convertibles entre sí.

La **segunda ley de la termodinámica** establece que la transferencia de calor (o energía) puede suceder de forma espontánea únicamente en una dirección: de un cuerpo más cálido a otro menos cálido. De la misma manera que una corriente de agua fluye desde una posición más elevada a una más baja, el flujo de calor pasa de una zona o cuerpo de mayor temperatura hacia otra con menor temperatura. Para invertir la dirección de transferencia se necesita el aporte de energía externa, de la misma forma que para invertir la corriente de agua se hace necesario el empleo de una bomba.

La magnitud de cualquier flujo de calor se puede medir de dos formas:

- **Flujo de calor o ratio de flujo de calor (Q)**, es decir, el flujo total por unidad de tiempo que atraviesa un determinado área de un cuerpo o del espacio, o dentro de un sistema definido. Se mide en  $\text{J} / \text{s}$  (Julio/segundo), es decir  $\text{W}$  (vatios).
- **Densidad de flujo de calor o ratio de densidad de flujo de calor.** Es la cantidad de flujo de calor por unidad de superficie de un cuerpo o espacio, en  $\text{W} / \text{m}^2$ . El  $\text{kW}$  ( $\text{kilowatio} = 1000\text{ vatios}$ ) es usado a menudo para ambas cantidades.

Otra unidad de medida, no estándar, aunque aceptada es la derivada del flujo de calor unitario es el Wh (watio hora) que es, la cantidad de energía entregada o gastada si un flujo de calor de 1 W es mantenido durante 1 hora.

## 2.2. FLUJO DE CALOR

El flujo de calor, desde un cuerpo más cálido a uno más frío puede ocurrir de tres formas: conducción, convección y radiación.

### 2.2.1. Conducción.

Se produce cuando un cuerpo/s se encuentran en contacto, por la propagación de movimiento molecular.

Depende de una propiedad de los cuerpos llamada **conductividad ( $\lambda$ )**, medida como la densidad de flujo de calor ( $W/m^2$ ) en un cuerpo de 1 m de espesor, con una diferencia de temperatura de un grado. Se mide en  $W/m \cdot K$ . Los materiales que poseen un bajo coeficiente de conductividad se caracterizan como aislantes. Estos presentan una estructura fibrosa o porosa y son muy sensibles a los contenidos de humedad ya que si los poros se llenan de agua la conductividad se incrementará drásticamente. Los materiales que presentan una estructura de espuma, es decir de poro cerrado, no son tan sensitivos.

Los productos para los cerramientos se definen mediante su conductividad térmica  $\lambda$  ( $W/m \cdot K$ ) y el factor de resistencia a la difusión del vapor de agua  $\mu$ . En su caso, además se podrá definir la densidad  $\rho$  ( $kg/m^3$ ) y el calor específico  $c_p$  ( $J/kg \cdot K$ )

La conductividad es una propiedad del material, independiente de su forma o tamaño. La propiedad equivalente para un cuerpo físico, como por ejemplo un muro, es la **conductancia (C)** medida entre las dos superficies del muro. Se calcula dividiendo el coeficiente de conductividad entre el espesor de la capa. Esta es una unidad raramente utilizada ya que no tiene en cuenta el efecto de las superficies del muro. La unidad más frecuente es la **transmitancia (U)** ya que incluye los efectos de las superficies del cerramiento. Se define como la densidad de flujo de calor ( $W/m^2$ ) con 1 K de diferencia de temperaturas entre el ambiente interior y el ambiente exterior. Se mide en  $W/m^2 \cdot K$ .

El valor recíproco a la transmitancia, es la **resistencia térmica**,  $U = 1/RT$ .

La resistencia térmica de cada elemento se calcula mediante la expresión:

$$R = e/\lambda$$

Siendo,

e: espesor capa

$\lambda$ : coeficiente de conductividad térmica del material ( $W/m \cdot ^\circ C$ ) es propio de cada material.

La resistencia superficial combina la resistencia a la convección y radiación, por lo tanto se ve afectada por las propiedades de radiación de las superficies.

### 2.2.2. Convección.

Desde un cuerpo sólido a un fluido (líquido o gas) o viceversa. En un sentido más amplio también es usado para referirnos al transporte de calor mediante un fluido en movimiento de una superficie a otra, en sentido estricto, la transferencia de masa.

La transmisión de calor por convección está en función del coeficiente de convección,  $h_c$  en  $W / m^2 K$ .

$$Q_v = A * h_c * \Delta T \text{ (W)}$$

Siendo,

A ( $m^2$ ): el área de contacto entre el cuerpo y el fluido.

$\Delta T$  (K=kelvin): la diferencia de temperatura entre el cuerpo y el fluido.

$h_c$  en  $W/m^2K$ : el coeficiente de convección.

El valor de  $h_c$  depende de la posición de la superficie, la dirección del flujo de calor y la velocidad del fluido, por ejemplo:

- Para superficies verticales,  $h_c = 3 W / m^2 K$
- Para superficies horizontales:
  - Si el flujo térmico es ascendente,  $h_c = 4.3 W / m^2 K$
  - Si es descendente,  $h_c = 1.5 W / m^2 K$

Si la superficie se ve expuesta al viento o algún tipo de movimiento de aire generado mecánicamente entonces, el coeficiente de convección es mucho mayor:

$$h_c = 5.8 + 4.1 * v$$

Siendo  $v$  = velocidad del aire en  $m/s$ .

### 2.2.3. Radiación.

Se produce desde un cuerpo con una superficie más cálida a otro con una superficie más fría. La radiación térmica es una banda de longitud de onda de radiación electromagnética, normalmente entre 700nm-10000nm (10  $\mu m$ ), infrarroja corta 700-2300 nm (2.3  $\mu m$ ), infrarroja larga 2.3-10  $\mu m$ . La temperatura de un cuerpo emisor determina la longitud de onda.

El Sol, con sus 6000 °C superficiales emite radiación infrarroja corta además de radiación visible y ultravioleta. Los cuerpos a temperaturas terrestres (< 100 °C) emiten radiación infrarroja larga.

La transferencia de calor por radiación es proporcional a la diferencia de la cuarta potencia de la temperatura absoluta de las superficies de emisión y de recepción y depende de sus cualidades superficiales, medidas por los números no dimensional.

**Reflectancia ( $\rho$ )** es un indicador de fracción decimal que indica cuánta de la radiación incidente es reflejada por la superficie.

**Absortancia ( $\alpha$ )** se expresa como fracción del "perfecto absorbedor", el cuerpo teórico negro para el cual  $\alpha = 1$ . Su valor es alto para superficies oscuras mientras que es bajo en superficies

claras o brillantes, siendo  $\alpha = 0.9$  para el asfalto negro mientras que  $\alpha = 0.2$  para una superficie de aluminio brillante. Para cualquier superficie opaca se cumple que  $\rho + \alpha = 1$ .

**Emitancia ( $\epsilon$ )** Se trata también de una fracción decimal, medida de la habilidad de emitir radiación en comparación con el "perfecto emisor" (el cuerpo negro). Para una superficie ordinaria,  $\alpha = \epsilon$  para la misma longitud de onda de radiación (o temperatura), aunque algunas superficies presentan propiedades selectivas como alta absorción de radiación solar (6000 °C) pero baja emitancia en temperaturas ordinarias (< 100 °C)

Estas superficies selectivas son útiles para los paneles de absorción de colectores solares, pero sucede lo contrario cuando lo que pretendemos es la disipación de calor (radiación en el cielo). Las pinturas blancas (especialmente las de óxido de titanio) presentan estas propiedades mientras que una superficie metálica brillante es una superficie no-selectiva.

El cálculo del intercambio de calor por radiación es complicado, pero es más sencillo para el efecto, el cual es más importante para los edificios: la radiación solar.

Si la densidad de flujo de la radiación incidente es conocida (irradiancia global), la tasa de entrada de calor solar radiante sería:

$$Q_s = A * G * \alpha \text{ (W)}$$

Las tres formas de transmisión de flujo de calor o densidad de flujo, dependen de la diferencia de temperatura entre las superficies o puntos considerados, por lo tanto el flujo también depende de la sección del área de la sección transversal del cuerpo o elemento.

## 2.3. EL CONFORT TÉRMICO

### 2.3.1. Definición

El confort térmico viene definido en el estándar europeo EN ISO 7730: 2005 y su trasposición española UNE-EN ISO 7730 : 2006<sup>27</sup> como el "estado de la mente que expresa satisfacción con el ambiente térmico". Está vinculado con factores medioambientales, pero también con la temperatura del local, la velocidad del aire, la humedad, actividad realizada, tipo de vestimenta de los usuarios y tasa metabólica.

Cada individuo posee una percepción diferente, por lo que, no es posible establecer un nivel de confort general válido para todos. Se ha demostrado que, incluso en un edificio con un diseño perfecto, alrededor del 5% de los usuarios se mostrarán insatisfechos.

El objetivo de esta norma es, por un lado, presentar un método para la estimación de la sensación térmica y grado de incomodidad para las personas expuestas a ambientes térmicos moderados (para el caso de ambientes extremos deberíamos recurrir a la ISO 7243:1998<sup>28</sup> e ISO 7933:1998<sup>29</sup>). Por otro lado, especificar los ambientes térmicos agradables para el bienestar.

---

<sup>27</sup>UNE-EN ISO 7730:2006 Ergonomía del ambiente térmico. Determinación analítica e interpretación del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios de bienestar térmico local (ISO 7730:2005).

<sup>28</sup>ISO 7243:1998 Estimación de la tensión térmica del hombre en el trabajo, basada en el índice WBGT (temperatura húmeda y de globo negro)

<sup>29</sup>ISO 7933:1998 Ambientes térmicos calurosos. Determinación analítica e interpretación de la sobrecarga térmica mediante el cálculo del índice de sudoración requerido.

El estándar internacional EN ISO 7730:2012 proporciona dos metodologías para predecir la sensación térmica general y el grado de disconfort de las personas mediante:

PMV (Predicted Mean Vote = Voto Medio Previsto): refleja la opinión de un grupo de personas sobre su sensación térmica, en una escala de 7 niveles, siendo:

+3	Muy caluroso
+2	Caluroso
+1	Ligeramente caluroso
0	Neutro
-1	Ligeramente fresco
-2	Fresco
-3	Frío

Tabla 16: Escala valoración PMV según ISO 7730: 1994

El PMV se basa en el balance térmico del cuerpo humano, así en un ambiente moderado el sistema termorregulador humano intentará modificar la temperatura cutánea para mantener el equilibrio térmico. El PMV puede determinarse una vez estimada la actividad (tasa metabólica), vestimenta (resistencia térmica) y la medición de la temperatura del aire, temperatura media de radiación, velocidad relativa del aire y presión parcial de vapor de agua.

El PMV ha sido establecido para condiciones estacionarias, aunque puede determinarse con una buena aproximación en el caso de pequeñas fluctuaciones de alguna de las variables, siempre que se tome el valor medio ponderado de medida de dichas variables para la hora previa. Se recomienda utilizar este índice cuando su valor esté comprendido entre +2 y -2 y siempre y cuando los parámetros principales estén comprendidos entre los siguientes valores:

Producción de energía metabólica (M)	46 - 232 W/ m <sup>2</sup> (0.8 - 4 met)
Resistencia térmica debida a la ropa (I <sub>cl</sub> )	0 - 0.310 m <sup>2</sup> °C/W (0 - 2 clo)
Temperatura del aire (t <sub>a</sub> )	10 - 30 °C
Temperatura media de radiación (t <sub>r</sub> )	10 - 40 °C
Velocidad relativa del aire (V <sub>ar</sub> )	0 - 1 m/s
Presión parcial de vapor de agua (p <sub>a</sub> )	0 - 2700 Pa

Tabla 17: Valores aconsejados parámetros PMV según ISO 7730: 1994

Para determinar los valores de tasa metabólica y resistencia térmica de la ropa se recurrirá a las tablas A1, E1 y E2 de los anexos de la citada norma.

Una vez obtenidos estos valores, determinaremos el valor del PVM según la formulación establecida en el apartado 3.1 de la norma mediante el programa informático en BASIC proporcionado en el anexo B; mediante las tablas del anexo C donde se establecen los valores de PVM según las distintas combinaciones de actividad, ropa, temperatura operatoria y velocidad relativa o bien mediante medida directa utilizando un sensor integrador.

El índice PMV se utiliza para determinar si un determinado ambiente cumple con las condiciones de bienestar de un ambiente fijados en la presente norma en el anexo D, donde se establecen los requisitos para el bienestar previstos para proporcionar una sensación térmica aceptable para el 90% de los ocupantes y para que un 85% no sufra corrientes de aire.

### **PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied = Porcentaje de Insatisfechos Previsto)**

El PMV refleja el valor medio de los votos por un grupo numeroso de personas al ser sometidos al mismo ambiente térmico. El índice PPD determina cuantos ocupantes estarían fuera del límite de confort y cuantos están térmicamente insatisfechos con el ambiente térmico. Este índice prevé, para un número elevado de personas, el porcentaje de aquellas que sentirán o bien demasiado frío, o bien demasiado calor (es decir, votarán +3, +2, -3, -2 en la escala de sensación térmica de 7 niveles de la tabla 13)

A partir del índice PMV, obtendremos de forma cuantitativa el índice PPD a través de la ecuación establecida en el punto 4 de la norma de referencia o bien a través del siguiente gráfico:

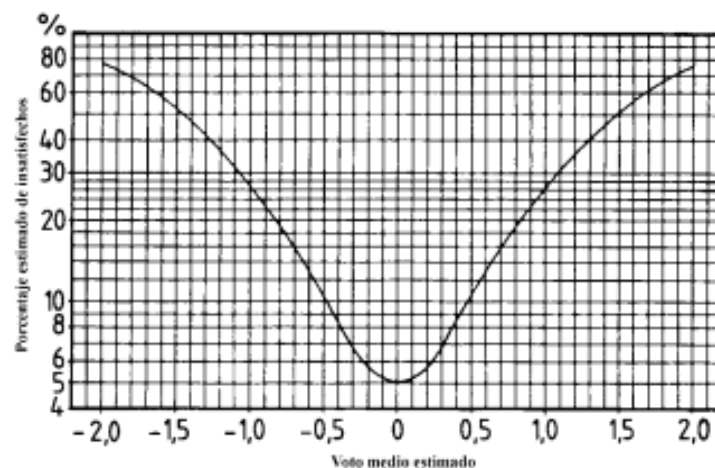


Gráfico 20: Porcentaje estimado de insatisfechos PPD según voto estimado PMV según ISO 7730: 1994

Estos índices expresan la sensación térmica y el grado de insatisfacción para el conjunto de los usuarios, pero esta insatisfacción puede ser motivada por el calentamiento o enfriamiento de una determinada parte del cuerpo debida, por ejemplo, a la existencia de corrientes, suelos demasiado fríos o demasiado calientes o diferencias de temperatura excesivas entre planos opuestos (por ejemplo entre cabeza y tobillos)



La molestia por corriente de aire o DR (Draught Rating) puede calcularse según formulación establecida en la norma a partir de la temperatura local del aire, la velocidad media local del aire y la intensidad local de turbulencia en tanto por ciento.

Este modelo de evaluación está basado en estudios sobre 150 individuos expuestos a velocidades medias entre 0.05 - 0.4 m/s y a intensidades de turbulencia entre 0 - 70 %. El modelo es aplicable a sujetos que realicen una actividad ligera, sedentaria y que experimenten una sensación térmica general próxima a la neutralidad.

El Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT) establece tres categorías de ambiente térmico en función de los índices PMV y PPD:

CATEGORÍA	ESTADO TÉRMICO DEL CUERPO EN SU CONJUNTO	
	PMV	PPD (%)
A	$-0.2 < \text{PMV} < +0.2$	$< 6$
B	$-0.5 < \text{PMV} < +0.5$	$< 10$
C	$-0.7 < \text{PMV} < +0.7$	$< 15$

Tabla 18: Categorías de ambiente térmico. Índices PMV y PPD (INSHT, 2007)

¿Por qué es importante el confort térmico?

- Según el informe “Indoor Air Quality, Thermal Comfort and Daylight” publicado el pasado mes de Marzo de 2015 por el Buildings Performance Institute Europe (BPIE):
- El exceso de calor de calefacción afecta negativamente a personas que sufren de enfermedades como diabetes, Parkinson, Alzheimer y/o enfermedades cardiovasculares.
- El exceso de frío y moho en las viviendas propicia la aparición de enfermedades respiratorias como el asma y afecta negativamente a la salud mental de las personas.
- Afecta al rendimiento escolar y bienestar emocional de los niños.

El uso de medidas, simple pero efectivas, como la dotación de elementos de sombreado, el uso de acristalamientos con protección solar, la ventilación o la dotación de controles que permitan al usuario crear una zonificación térmica mejorará el nivel de confort del usuario, evitando el llamado estrés térmico.

El confort interior fundamentalmente se define por el ambiente térmico, ambiente lumínico, acústico y por el entorno visual.

Algunos factores que guardan relación directa con el ambiente térmico, y por lo tanto con la calidad del ambiente interior, son:

- Uso del espacio.
- Especificación de la zona ocupada.
- Número de ocupantes.

- Clima exterior.
- Superficie acristalada.
- Carga térmica originada por las personas, equipos, radiación solar, ...
- Uso de elementos de apantallamiento solar.
- Existencia de ventanas practicables.

### 2.3.2. La humedad ambiente: psicrometría.

La **Psicrometría** es la rama de la ciencia que se estudian las propiedades termodinámicas del aire húmedo y del efecto de la humedad atmosférica en los materiales y en el confort humano.

El aire está compuesto principalmente por oxígeno y nitrógeno, pero la atmósfera existente a nuestro alrededor tiene cierto contenido de humedad, el cual es variable. Para una temperatura establecida, el aire puede admitir una cantidad determinada de agua, llegado el cual se dice está saturado.

Los diagramas psicrométricos relacionan la temperatura de bulbo húmedo con el contenido de humedad (o humedad absoluta) en gramos de humedad por kilo de aire seco. La curva superior de la gráfica representa la línea de saturación, la cual indica el contenido máximo de humedad soportado para cada temperatura. El encuentro de cada una de las subdivisiones verticales del gráfico con cada una de las curvas representan la humedad relativa HR (en %).

Otra expresión para la humedad es la presión de vapor o  $p_v$ , es decir, la presión parcial de vapor de agua en una atmósfera dada. La presión de saturación de vapor de agua se expresa como  $p_{vs}$

Entonces, si  $HR = (HA/HS) * 100$  ó  $(p_v/p_{vs}) * 100$  (en %) la presión de vapor está linealmente relacionada con la humedad absoluta:

$HA = (622 * p_v) / (p_t - p_v)$ , siendo  $p_t$  la presión barométrica total tomada como 101325 kPa para una atmósfera estándar.

La mejor forma para medir la humedad es con un psicrómetro de bulbo húmedo y seco o un psicrómetro aspirado. Contienen dos termómetros, uno de los cuales tiene su bulbo envuelto en una gasa la cual se mantiene húmeda en un pequeño contenedor de agua. Cuando se le da la vuelta para obtener la máxima evaporación posible, mostrará la temperatura de bulbo húmedo (WBT). El segundo termómetro mide la temperatura del aire o temperatura de bulbo seco (DBT). A la diferencia entre WBT-DBT nos referimos como la depresión de bulbo húmedo y es indicador de la humedad. La evaporación de la gasa causa un efecto de refrigeración, el cual produce la temperatura de bulbo húmedo. La evaporación es inversamente proporcional a la humedad.

En un aire saturado, no existe evaporación ni refrigeración, por lo que  $WBT = DBT$ .

En un ambiente con una humedad baja, existe una gran evaporación, por lo que también una gran refrigeración y una gran depresión de bulbo húmedo.

En un diagrama psicrométrico, las líneas inclinadas muestran los valores de DBT, las cuales confluyen en la curva de saturación. Cuando efectuamos una medición, la intersección de las líneas de WBT y DBT (punto al que nos referiremos como "punto de estado") mostrarán no sólo

el valor de la humedad relativa (interpolado entre las curvas de humedad relativa) sino también el valor de la humedad absoluta (leyéndola en la escala vertical de la derecha)

La **entalpía (H)** es el contenido de calor del aire a una temperatura de 0 °C y con una humedad del 0 %. Se expresa en kJ/kg, por lo tanto es el calor contenido por kilo de aire. Tiene dos componentes:

- El calor sensible ( $H_s$ ): tomado para aumentar la temperatura de bulbo húmedo (aprox. 1005 kJ/kg K)
- El calor latente ( $H_L$ ): el calor que fue necesario para calentar el agua líquida hasta transformarla en la humedad ambiente.

Como las líneas constantes de entalpía casi coinciden con las líneas de WBT, para evitar confusiones, se indica con escalas duplicadas en ambos lados, fuera del cuerpo del diagrama y en una línea recta. Si la entalpía es la línea diagonal que pasa por el punto de estado, la componente horizontal será  $H_s$  y la componente horizontal será  $H_L$ .

El **volumen específico del aire** en cualquier situación también se muestra en el diagrama, por una serie de líneas con una pendiente pronunciada. Esto es el volumen de aire ocupado por kilo de aire a presión normal, en m<sup>3</sup>/kg. Es la inversa de la densidad.

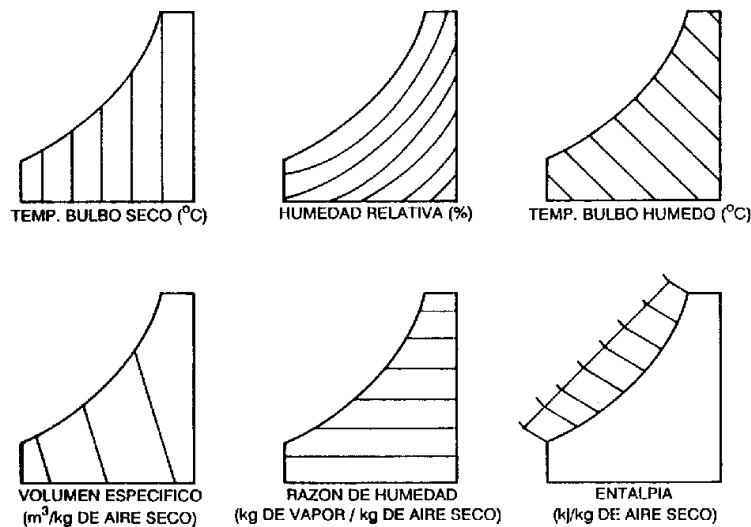


Ilustración 16: Líneas interpretación diagrama psicrométrico ([www.fastonline.org](http://www.fastonline.org))

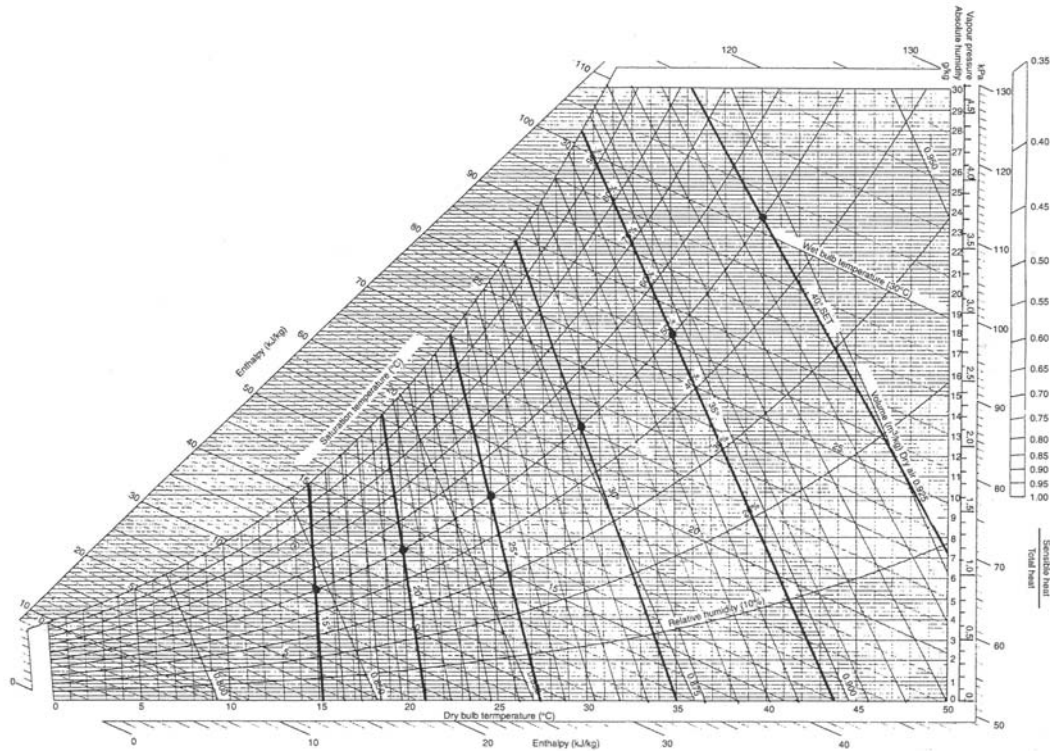


Ilustración 17: Diagrama psicrométrico con líneas SET (Szokolay, 2004)

### 2.3.3.El confort térmico. Balance térmico.

El cuerpo humano produce calor de manera constante debido a los procesos metabólicos, el cual es disipado a la atmósfera para que la temperatura corporal no se vea incrementada. Un cuerpo humano produce como término medio 100 W de calor, pero esto puede variar desde los 70 W en reposo (durmiendo) hasta por encima de los 700 W cuando estamos realizando una actividad física intensa.

La temperatura interna del cuerpo ronda los 37 °C, mientras que la temperatura de la piel puede variar desde los 31 hasta los 34 °C.

El balance térmico del cuerpo humano se puede expresar como:

$$M \pm R_d \pm C_v \pm C_d - E_v = \Delta S$$

Siendo:

M: producción de calor metabólico.

$R_d$ : Intercambio de radiación neta.

$C_v$ : convección.

$C_d$ : conducción.

$E_v$ : evaporación.

$\Delta S$ : variaciones en el calor almacenado.

La condición de equilibrio es que la suma de todos los términos de la ecuación sea igual a cero, siendo dicho equilibrio la condición previa para el confort térmico.

Los factores que influyen en el confort térmico son tanto físicos como fisiológicos, por lo que se pueden agrupar de la siguiente forma:

<b>Ambientales</b>	<b>Personales</b>	<b>Otros</b>
Temperatura del aire	Tasa metabólica	Comida y bebida
Movimiento del aire	Ropa	Forma física
Humedad	Estado de salud	Grasa subcutánea
Radiación	Aclimatación	Edad y género

Tabla 19: Factores que determinan el confort térmico (Szokolay, 2004)

#### **2.3.4. Factores que influyen en el confort.**

##### **2.3.4.1. La temperatura del aire.**

La temperatura del aire es el factor ambiental dominante y determina la disipación del calor por convección. Se define como la medida a la altura de la cabeza y a una distancia mínima de 1.5 m. de distancia de las paredes de locales cerrados.

El aire en movimiento acelera los procesos de convección, pero también cambia la temperatura superficial de la piel y reduce la resistencia superficial de la ropa, así como incrementa la evaporación de la piel produciendo así un efecto psicológico de refrigeración.

##### **2.3.4.2. Humedad.**

Los valores intermedios de humedad relativa, del 30 - 65 %, no producen demasiados efectos. Sin embargo, porcentajes elevados de humedad reducen la evaporación a través de la piel y en la respiración, frenando el mecanismo de disipación, mientras que humedades muy bajas conducen a la desecación de las mucosas y la piel, causando sensación de discomfort.

##### **2.3.4.3. Radiación.**

El intercambio de radiación depende de la temperatura de las superficies que nos rodean.

La temperatura media radiante (MRT) es la percibida por el usuario como resultado de la temperatura de las superficies del local.

La temperatura media radiante no puede ser medida directamente, sólo es posible mediante un termómetro de globo negro, el cual responde tanto a los impulsos radiantes como a la temperatura. Se compone de una bola de cobre, pintada de negro mate y con un termómetro en su interior.

#### 2.3.4.4. Tasa metabólica.

Está en función del nivel de actividad. La unidad de medida de la tasa metabólica es el "met" el cual equivale a  $58.2 \text{ W /m}^2$  de área de superficie corporal. Para una persona tipo, este valor ronda los 115 W. A medida que aumenten los valores de tasa metabólica, se preferirán ambientes más fríos para facilitar la disipación.

#### 2.3.4.5. Ropa.

La ropa constituye el aislamiento térmico del cuerpo. La unidad de medida es el clo, el cual significa un valor de  $U = 6.45 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  (o una resistencia de  $0.155 \text{ m}^2 \text{ K / W}$ ). 1 clo equivale a un traje de tres piezas con una camiseta interior de algodón mientras que un pantalón corto con camiseta de manga corta supondrá 0.5 clo. Si la vestimenta pudiese ser elegida siempre libremente, constituiría un importante mecanismo de ajuste térmico, pero muchas veces esto no es posible debido a hábitos sociales establecidos o condiciones de seguridad, por lo que se debe compensar con medidas de refrigeración de aire.

#### 2.3.4.6. Comida y bebida.

La alimentación influye directamente en el valor de la tasa metabólica y por lo tanto tienen un efecto directo en las preferencias en lo que a ambiente térmico se refiere. Cambia con el tiempo dependiendo del tipo de alimentación.

#### 2.3.4.7. Forma física y grasa corporal.

Es determinante en la producción de calor en cuanto a que la producción de calor es proporcional a la masa corporal, pero la disipación de calor sólo depende de la superficie corporal.

Un persona alta y delgada tiene una superficie corporal elevada en relación con su volumen por lo que su capacidad para disipar calor es buena y puede soportar temperaturas más cálidas que una persona más robusta.

Este efecto se verá incrementado por el hecho de que la grasa subcutánea es un buen aislante térmico y por lo tanto mostrará preferencia por las temperaturas más reducidas.

#### 2.3.4.8. Edad y género.

Diferentes estudios recogían que las mujeres prefieren temperaturas del orden de  $1^\circ\text{C}$  superiores a los hombres, sin embargo recientemente esta diferencia se ha asociado a los distintos hábitos en la vestimenta, por lo que esta diferencia entre géneros parece desestimada.

En cuanto a la edad, no establece diferencias significativas en lo que a preferencias de temperaturas se refiere, sin embargo cabe destacar que las personas ancianas muestran menos tolerancia a las variaciones de la temperatura óptima, probablemente debido a que sus mecanismos de regulación se encuentren más o menos deteriorados.

### 2.3.5. índices y zonas de confort

Las condiciones de confort aceptable, están generalmente referidas a las zonas de confort.

Los límites de temperatura para esas zonas de confort se puede tomar como una pequeña variación de  $\pm 2.5^\circ\text{C}$  sobre la temperatura neutra (NT)

$$T_n = 17.6 + 0.31 * T_{o,av}$$

donde:

$T_{o,av}$ : es la temperatura media exterior del mes .

El confort térmico está influenciado por otros tres factores ambientales. Desde 1900 se ha intentado establecer un índice de confort único que combinase los efectos de las cuatro variables, o al menos varias de ellas.

El primer intentó fue el llevado a cabo por Houghten y Yagoglou, llamado "Temperatura efectiva". Desde entonces, un sinfín de índices fueron desarrollados a lo largo de los años por diferentes investigadores, basados en diferentes estudios.

En 1953 Olgyay introduce el diagrama bioclimático el cual presenta en el eje horizontal DBT<sup>30</sup> y la HR<sup>31</sup> en el vertical y la superficie central señala la zona de confort.

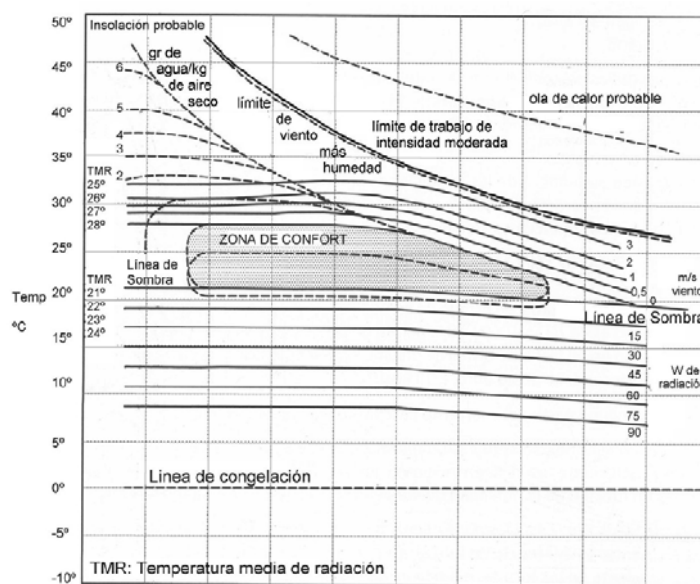


Gráfico 21: Diagrama bioclimático de Olgyay ([www.arquimatica.com](http://www.arquimatica.com))

Las curvas superiores muestran como el movimiento del aire puede incrementar los límites superiores y las líneas inferiores muestran la extensión por radiación.

Yagoglou desarrolló en 1923 la Escala de Temperatura Efectiva (ET) para reconocer los efectos que la humedad sobre la sensación térmica. La ET coincide con DBT en la curva de saturación del diagrama psicrométrico y las líneas de confort se encuentran inclinadas hacia la derecha.

<sup>30</sup>DBT: temperatura de bulbo seco.

<sup>31</sup>HR: humedad relativa

Este y otros nomogramas derivados de este han sido ampliamente utilizados por la mayoría de publicaciones de ASHRAE.

Gagge, en investigaciones más recientes, creó la "Nueva Escala de Temperatura Efectiva" (ET\*) y su versión estandarizada, el SET. El ET\* construido para 0.57 clo y 1.25 met ha sido establecido para validar las siguientes condiciones (un incremento en el met puede ser compensado con una disminución de clo):

Met	Clo
1	0.67
1.25	0.57
2	0.39
3	0.26
4	0.19

El SET coincide con DBT en el 50 % de la curva de HR. La pendiente de las líneas SET indican que a mayor humedad, la tolerancia en las temperaturas se reduce, por lo tanto a menor contenido de humedad se admiten temperaturas más elevadas. Por encima de 14 °C, la humedad no tiene influencia en el confort térmico (ET\* = DBT). A medida la pendiente de las líneas SET.

El SET combina el efecto de la humedad y la temperatura, los dos determinantes más importantes. La zona de confort puede ser trazada en el diagrama que variará con el clima y los meses del año.

## 2.4. COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LOS EDIFICIOS.

Un edificio puede ser considerado como un sistema térmico análogo al cuerpo humano (ver capítulo El confort térmico. Balance térmico.) con una serie de inputs y outputs de calor:

$$Q_i + Q_c + Q_s + Q_v + Q_e = \Delta S$$

Donde,

$Q_i$ : ganancias de calor internas.

$Q_c$ : pérdidas o ganancias de calor por conducción.

$Q_s$ : ganancias solares.

$Q_v$ : ganancias o pérdidas por ventilación.

$Q_e$ : pérdidas de calor por evaporación.

$\Delta S$ : es el cambio en el calor almacenado en el edificio.



Existe un balance térmico cuando la suma de todos los factores es igual a cero. Si la suma es superior a cero significa que la temperatura en el interior del edificio está aumentando mientras que si es menor a cero se está enfriando.

Este sistema puede ser analizado estableciendo:

- Condiciones en estado estacionario: significa que tanto las condiciones internas como las externas al edificio no varían. Esto puede ser válido si no existe una gran diferencia en las temperaturas diurnas en comparación con la variación entre las temperaturas internas y externas, como base para encontrar los requerimientos de calefacción y/o refrigeración o bien como una primera aproximación al diseño de los cerramientos.
- Considerar la respuesta dinámica del edificio.

El input más importante en un edificio es la ganancia por radiación solar.

### **2.3.6. Cálculo de la radiación solar.**

En lo relativo al control solar, lo primero es determinar en qué momentos o períodos del año las ganancias por radiación solar nos benefician (períodos de invierno) y en qué momentos debemos evitarla (períodos de verano). En cualquier lugar y con respecto a una superficie con cualquier orientación y ángulo de inclinación, el ángulo de incidencia cambia continuamente.

La irradiancia global (G) incidente en una superficie cualquiera se compone de dos componentes principales:

- Un componente directa que alcanza la superficie siguiendo la trayectoria de una línea recta desde el sol.
- Una componente difusa, es decir, la radiación dispersa por la atmósfera llegando a la superficie desde todo el cielo del hemisferio (depende de cuánto hemisferio es visto desde la superficie)

Pero también:

- Una componente reflejada. Si la superficie es distinta de la horizontal, puede ser alcanzada por el reflejo de la radiación incidente en otra superficie o el suelo.

A menudo, los datos disponibles nos dan sólo los valores de irradiancia total horizontal para un día normal de cada mes. Antes de transponerlo a otros planos, debemos separar la componente directa y la difusa, para poder así estimar los valores para cada una de las componentes. Se trata de un cálculo complejo, más adaptado para ordenadores.

### **2.3.7. Ganancias por radiación solar.**

Se considera diferentemente para las superficies opacas y transparentes, aunque en ambos casos debe ser conocido el valor de la irradiancia (G en W / m<sup>2</sup>).

**Elementos transparentes** (ventanas): la ganancia solar es el producto de  $G$ , el área del elemento acristalado y el factor de ganancia solar ( $\theta$ ). Este factor es una fracción decimal que indica que parte de la radiación incidente en el elemento alcanza el interior.

Una parte de la radiación solar incidente es transmitida ( $\tau$ ), otra parte es reflejada ( $\rho$ ) y la restante absorbida ( $\alpha$ ) por el cuerpo del cristal.

$$\tau + \rho + \alpha = 1$$

La parte absorbida calentará el cristal, el cual emitirá parte de este calor al exterior mientras que otra parte será emitida al interior por re-radiación y convección. El factor solar es la suma de este calor re-emitido hacia el interior más la transmisión directa, por lo tanto:

$$Q_s = A * G * \theta$$

En cuanto a los elementos opacos la ganancia de calor se trata a través del concepto de temperatura sol-air. La ganancia de calor por radiación en una unidad de superficie depende de su absorptancia ( $\alpha$ ):

$$Q_{in} = Q_{loss} = G * \alpha$$

Esta ganancia de calor elevará la temperatura superficial ( $T_s$ ) provocando una disipación de calor al ambiente.

La pérdida de calor depende de la conductancia de la superficie ( $H$ )

$$Q_{loss} = h * (T_s - T_o)$$

Como la temperatura de la superficie se ve incrementada, el equilibrio se alcanzará cuando  $Q_{in} = Q_{loss}$ , por lo tanto:

$$G * \alpha = h * (T_s - T_o)$$

$T_s$  se puede expresar como:

$$T_s = T_o + G * \alpha / h \text{ ó } T_s = T_o + G * \alpha * R_{so} \text{ (} 1/h = R_{so} \text{)}$$

Esta derivación descuida cualquier flujo de calor desde la superficie hacia el cuerpo del elemento, por lo tanto  $T_s$  no es una verdadera temperatura de la superficie, es la temperatura sol-air, la cual es la fuerza impulsora del flujo de calor.

Para superficies expuestas directamente al cielo (tejados) debe ser incluido un término de emisión radiante en la expresión de la temperatura sol-air:

$$T_{s-a} = T_o + (G * \alpha - E) / h \text{ ó } T_s = T_o + (G * \alpha - E) * R_{so}$$

Normalmente se considera  $E = 90 \text{ W / m}^2$  para los días claros y  $E = 20 \text{ W / m}^2$  para cielos nublados.

El flujo de calor a través de un elemento opaco iluminado por el sol será:

$$Q_c = A * U * (T_{s-a} - T_i)$$

La temperatura del aire  $T_o$  se considera la misma todo alrededor, sin embargo la  $T_{s-a}$  es diferente para cada cara del edificio. Por lo tanto es conveniente dividir la  $T_{s-a}$  en una  $T_o$  más un incremento de exceso de temperatura sol-air ( $dT_e$ ) el cual es equivalente a la ganancia solar de calor por encima del efecto de la temperatura del aire.

El efecto de la temperatura del aire se evalúa por la expresión de la conducción ( $Q_c$ ) tomando  $q_c = \sum (A * U)$  y  $\Delta T = T_o - T_i$  para todo el edificio y un flujo de calor extra debido a la radiación solar calculado de forma independiente para cada cara del edificio como  $Q_s = q_c * dT_e$  siendo:

- $dT_e = (G * \alpha - E) * R_{so}$  para cubiertas.
- $dT_e = (G * \alpha) * R_{so}$  para muros.

### 2.3.8. Flujo en estado estacionario.

Las ganancias internas incluyen además el calor generado en el interior de los edificios como consecuencia de la ocupación humana, electrodomésticos, iluminación, ... No sólo para los electrodomésticos sino también para la iluminación eléctrica el ratio de consumo total (en W) debe considerarse teniendo en cuenta el flujo de calor emitido durante su uso (potencia \* tiempo = energía,  $W * h = Wh$ )

Para los cálculos en estado estacionario es habitual tomar el ratio promedio de las ganancias internas diarias, por lo tanto se consideran todas las ganancias del día y se dividen entre 24 h para obtener el ratio promedio en W.

Tal y como se ha visto en el capítulo anterior, el cerramiento posee una resistencia térmica que refleja el efecto de la conducción, la convección y la radiación sobre él.

No proporciona información acerca de las características del edificio ni de su funcionamiento. Se basa en el comportamiento medio del sistema, eliminando la parte dinámica de los fenómenos térmicos.

#### Conducción del flujo de calor

$$q_c = \sum (A * U) \text{ en W / K}$$

Es el ratio de flujo de calor por conducción a través de toda la envolvente del edificio con  $\Delta T = 1 \text{ K}$  entre el interior y el exterior.

La resistencia al flujo térmico de una capa de material es:

$$R = e / \lambda$$

Siendo,

$e$  = espesor de la capa en metros (m)

$\lambda$  = la conductividad térmica de diseño del material que compone la capa, que se puede calcular a partir de los valores térmicos declarados según la norma UNE EN 10456:2012<sup>32</sup>

Los valores de conductividad térmica de cada material podremos obtenerlos directamente de los fabricantes o bien a los datos contenidos en documentos reconocidos, como el catálogo de materiales del CTE.

---

<sup>32</sup>UNE EN 10456:2012 Materiales y productos para la edificación. Propiedades higrotérmicas. Valores tabulados de diseño y procedimientos para la determinación de los valores térmicos declarados y de diseño. (ISO 10456:2007)

En caso de que el elemento separador esté constituido por varias capas, la resistencia total o  $R_T$  ( $\text{m}^2\text{°C} / \text{W}$ ) se calculará como la suma de las resistencias de cada capa como sigue:

$$R_T = R_{se} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{si}$$

Siendo:

$R_T$ : Resistencia térmica total

$R_{se}$ : Resistencia térmica superficial del aire exterior

$R_1 + R_2 + \dots + R_n$ : Resistencia térmica de cada capa

$R_{si}$ : Resistencia térmica superficial del aire interior

Los valores de  $R_{se}$  y  $R_{si}$  se definen según la tabla 1 del DA-DB-HE1 del CTE adjunta:

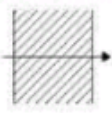

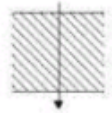
RESISTENCIAS TÉRMICAS SUPERFICIALES DE CERRAMIENTOS EN CONTACTO CON EL AIRE EXTERIOR			
POSICIÓN DEL CERRAMIENTO Y SENTIDO DEL FLUJO		$R_{se}$	$R_{si}$
Cerramientos verticales o con pendiente sobre la horizontal $> 60\%$ y flujo horizontal		0.04	0.13
Cerramientos horizontales o con pendiente sobre la horizontal $\leq 60\%$ y flujo ascendente		0.04	0.10
Cerramientos horizontales y flujo descendente		0.04	0.17

Tabla 20: Valores de  $R_{se}$  y  $R_{si}$  según DA-DB-HE1 del CTE

Otro aspecto importante a considerar en los cerramientos, son las cámaras de aire, las cuales en función de su espesor y posición adoptará unos valores según la tabla 2 del DA-DB-HE1 del CTE:

e (cm)	Horizontal	Vertical
1	0.15	0.15
2	0.16	0.17
5	0.16	0.18

Tabla 21: Resistencias térmicas de cámaras de aire sin ventilar según DA-DB-HE1 del CTE

El flujo de calor total por conducción del edificio será:

$$Q_c = q_c * \Delta T \text{ ó } Q_c = \sum (A * U) * \Delta T$$

siendo  $\Delta T = T_o - T_i$  (diferencia entre la temperatura interior y exterior del edificio)

El valor de  $Q_c$  será positivo cuando existan ganancia de calor y negativo cuando lo que se produzcan sean pérdidas.

### 2.3.9. Respuesta dinámica de los edificios.

El aislamiento capacitivo, es decir, materiales con una elevada capacidad térmica (construcciones masivas) afectan no sólo la magnitud del flujo de calor sino también su temporización. Tanto los aislamientos resistivos como capacitivos responden instantáneamente a los cambios de temperatura. Tan pronto como existe una ganancia de calor en una de las caras aparecerá una pérdida en la cara opuesta, aunque de manera controlada. Esto se basa en la capacidad térmica de los materiales y su acción sobre el flujo térmico.

En un régimen no estacionario en el cual se producen variaciones de temperatura al azar el trazado del flujo térmico requiere de sofisticados y extensos métodos de cálculo que sólo son factibles a través del empleo de programas informáticos. Existe un subconjunto de regímenes no estacionarios, el flujo térmico periódico, cuyo análisis es bastante sencillo.

El **flujo térmico periódico** se ilustra en la siguiente gráfica:

La línea continua representa el flujo de calor a través de un muro de mampostería mientras que la línea discontinua representa el flujo de un cerramiento de "masa cero" con el mismo valor de  $U$ . Esta curva sería el resultado del flujo térmico para un régimen estacionario para cada hora. Ambas curvas muestran un ciclo de 24 h, pero difieren en dos aspectos:

La curva de flujo térmico del muro de mampostería se ve retrasada con respecto a la del cerramiento de "masa cero". Este retraso del pico más alto de la curva del muro de mampostería con respecto al del muro de masa cero se denomina **tiempo de desfase** ( $\Phi$ ) y se mide en horas.

La amplitud de la oscilación del promedio del flujo térmico diario es menor para el muro de mampostería que para el muro de "masa cero". A la relación existente entre las dos amplitudes se denomina factor de decremento ( $\mu$ ) siendo  $\mu = sQ / sQ_0$

De la misma manera se podría confeccionar una gráfica similar, pero situando en esta ocasión a la temperatura en el eje vertical mientras que las dos líneas representarían la temperatura superficial interior y exterior del cerramiento.

Al final del presente documento, en la parte relativa a los anexos se adjunta ficha técnicas con los valores de transmitancia, admitancia, tiempo de desfase y factor de decremento para varios tipos de elementos constructivos de uso habitual.

La siguiente figura muestra el tiempo de desfase y el factor de decremento para un cerramiento sólido, masivo y homogéneo (como por ejemplo ladrillo, mampostería, hormigón o tierra) y la aplicación de un aislamiento en la superficie interior o exterior del citado cerramiento:

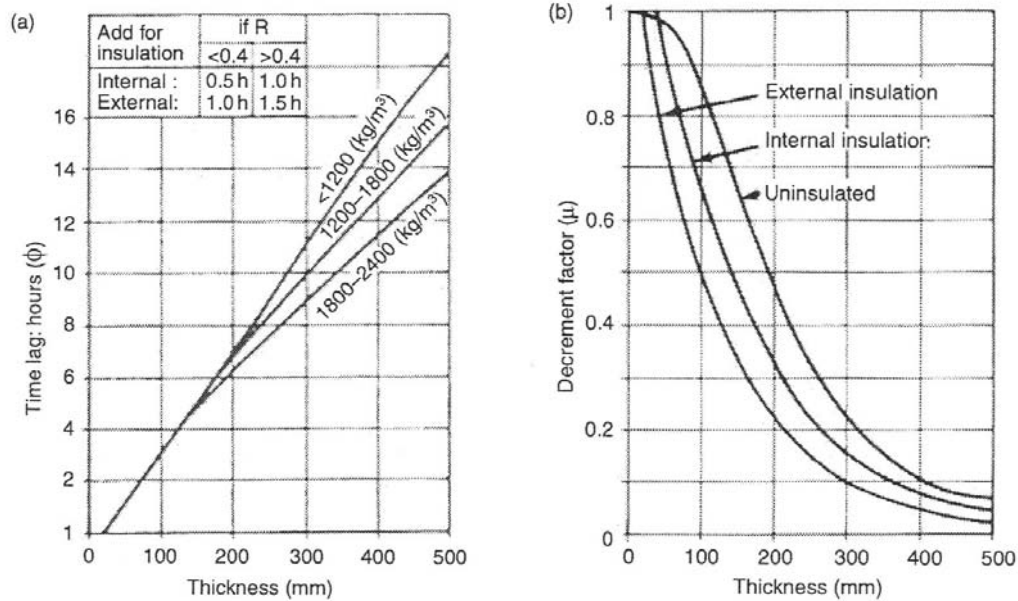


Gráfico 22: Tiempo de desfase y factor de decremento para un cerramiento sólido y homogéneo (Szokolay, 2004)

Si se toman dos elementos siendo el primero compuesto por un muro de ladrillo de 200 mm de espesor y el segundo por una lámina de poliestireno de 10 mm, ambos con el mismo valor de  $U$  ( $W/m^2 K$ ) el flujo de térmico a través de los mismos sería idéntico y los cálculos bajo condiciones de estado estacionario arrojarían idénticos resultados. En la vida real, su comportamiento sería bastante diferente. La diferencia radica en que el muro de ladrillo tiene una densidad superficial de  $375 \text{ kg/m}^2$  mientras que para el poliestireno es de únicamente  $5 \text{ kg/m}^2$ . Las respectivas capacidades térmicas son de  $300 \text{ kJ/m}^2$  y  $7 \text{ kJ/m}^2$ .

Para el caso del muro de ladrillo, cada pequeña capa de material almacena una cantidad de calor que incrementa su temperatura antes de que pueda transmitirlo a la capa siguiente. Este calor almacenado será posteriormente emitido con un tiempo de desfase considerable.

La siguiente figura muestra la secuencia de tiempo de los perfiles de temperatura a través de este muro.

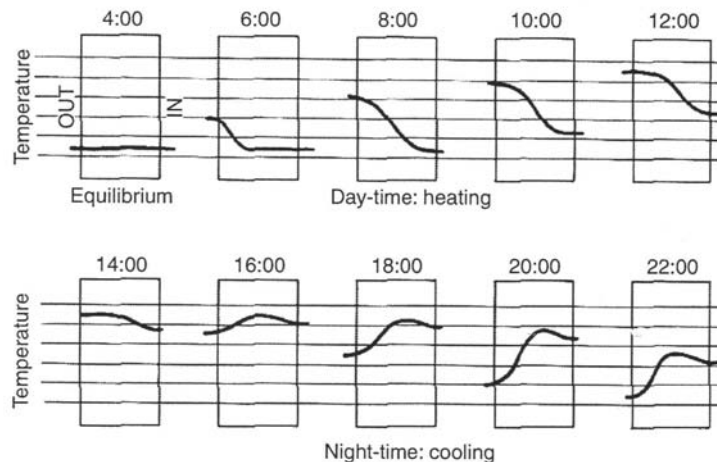


Gráfico 23: Secuencia de temperaturas para un cerramiento masivo en clima cálido (Szokolay, 2004)

Como se puede apreciar, desde las horas próximas al anochecer en adelante la parte central del cerramiento es la más cálida y el calor almacenado comienza a fluir hacia atrás. Entonces, asumiendo que el flujo de calor hacia el interior, sólo una parte del calor que ha penetrado a través de la superficie exterior del muro alcanzará la superficie interior.

En el caso de la lámina de poliestireno, los perfiles de temperatura serían una línea recta con pendiente que se desplazaría hacia arriba o hacia abajo dependiendo de los cambios de temperatura existentes.

El procedimiento de cálculo para obtener el flujo térmico periódico de un elemento masivo se compone de dos partes:

- Encontrar el promedio de flujo térmico diario
- Encontrar la desviación de este valor promedio para cada hora del día

Primeramente debemos obtener la temperatura media sol-air de la superficie exterior  $T_{s-a}$ , luego el promedio de las diferencias de temperaturas  $\Delta T$  para luego obtener  $Q_c = q_c * \Delta T$ .

Para calcular la desviación de la tasa de flujo de calor media:

$$sQ_{c_t} = q_c * \mu * (T_{s-a(t-\Phi)} - T_{s-a})$$

El efecto de **aislamiento capacitivo** o **masa térmica** será mayor para los climas cálidos y secos, ya que muestran grandes variaciones térmicas a lo largo del día. Algunas fuentes sugieren que un rango intermedio (el rango entre las temperaturas medias máximas y mínimas, promediadas para los 12 meses) de 10 K justificaría la construcción de elementos pesados mientras que otros establecen este límite en 8 K.

El aislamiento capacitivo tiene un efecto amortiguador y estabilizador, puede incrementar el confort y si además el edificio está acondicionado, ahorro energético.

Las propiedades dinámicas de un cerramiento multicapa (tiempo de desfase, factor de decremento, y admitancia) dependen no sólo de los materiales y el espesor de cada capa, sino también del orden de estas capas con respecto a la dirección del flujo térmico.

### 2.3.10. El efecto de la masa térmica

El efecto de la masa térmica proporcionado por construcciones masivas es beneficioso en diferentes situaciones:

- En un clima frío, en una edificación con ocupación constante ( una vivienda o un hospital), permitiría el uso intermitente de los sistemas de calefacción y aún así mantener una temperatura estable.
- En el caso de edificaciones con un uso intermedio (como puede ser una escuela o un edificio de oficinas) con una construcción ligeramente aislada, el comportamiento sería mejor. Las construcciones masivas tendrían un largo período de calentamiento durante la mañana y este calor almacenado sería disipado durante la noche.

Este mismo argumento es válido para edificaciones acondicionadas en climas cálidos y húmedos, donde incluso las noches son cálidas.

El efecto de la masa térmica es una de las estrategias más importantes elementos de control pasivo. Si existe masa de almacenamiento, esta puede ser manipulada de acuerdo con las condiciones climáticas de la zona.

Para un clima tropical cálido y húmedo, con grandes variaciones diurnas en la temperatura desde valores muy elevados a valores muy bajos (dando como resultado los valores intermedios de temperatura diarios dentro de la zona de confort) las construcciones masivas representan la solución perfecta, asegurando condiciones de confort interior sin ningún sistema mecánico de ventilación (o calefacción nocturna).

#### ¿Cómo se define si una edificación es "masiva" o "ligera"?

El criterio es la "masa específica" del edificio:

$$sM = \text{masa total del edificio} / \text{superficie de edificio (kg /m}^2\text{)}$$

o bien con el "factor de respuesta" de CIBSE, definido como:

$$f = (q_a + q_v) / (q_c + q_v)$$

siendo,

$q_a$  : admitancia

$q_v$ : tasa de ventilación del edificio

$q_c$ : flujo de calor por conducción

	sM (kg /m2)	F
Ligero	< 150	<3
Medio	150 - 400	3 - 5
Pesado	> 400	> 5

ó



	sM (kg /m2)	F
Ligero	$\leq 250$	$\leq 4$
Pesado	$> 250$	$> 4$

Tabla 22: Clasificación de una edificación según su "masa específica" o factor "f" de CIBSE (Szokolay, 2004)

## 2.5. EL CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN. DB HE: AHORRO DE ENERGÍA.

El Código Técnico de la Edificación (CTE) fue aprobado el 17 de marzo de 2006 por el RD 314/2006.

Objeto del CTE:

*"Es el marco normativo por el que se regulan las exigencias básicas de calidad que deben cumplir los edificios, incluidas sus instalaciones, para satisfacer los requisitos básicos de seguridad y habitabilidad, en desarrollo de lo previsto en la disposición final segunda de la Ley 38/1999, de 5 de noviembre, de Ordenación de la Edificación, en adelante LOE<sup>33</sup>*

*Establece las exigencias básicas para cada uno de los requisitos básicos de "seguridad estructural", "seguridad en caso de incendio", "seguridad de utilización y accesibilidad", "higiene, salud y protección del medio ambiente", "protección contra el ruido" y "ahorro de energía y aislamiento térmico", establecidos en el artículo 3 de la LOE, y proporciona procedimientos que permiten acreditar su cumplimiento con suficientes garantías técnicas.*

*Los requisitos básicos relativos a la "funcionalidad" y los aspectos funcionales de los elementos constructivos se regirán por su normativa específica, salvo los vinculados a la accesibilidad de personas con movilidad o comunicación reducida, que se desarrollarán en el CTE.*

*Las exigencias básicas deben cumplirse, de la forma que reglamentariamente se establezca, en el proyecto, la construcción, el mantenimiento, la conservación y el uso de los edificios y sus instalaciones, así como en las intervenciones en los edificios existentes."*

El CTE es de aplicación, según los términos establecidos en la LOE, a todo edificio de uso administrativo o privado que precisen de licencia o autorización legal para su ejecución.

Será de aplicación a todas las obras de edificación de nueva construcción, excepto a aquellas construcciones de sencillez técnica y de escasa entidad constructiva, que no tengan carácter residencial o público, ya sea de forma eventual o permanente, que se desarrollen en una sola planta y no afecten a la seguridad de las personas.

Igualmente será de aplicación a intervenciones en edificios existentes, y su cumplimiento quedará justificado en el proyecto por técnico competente, junto a la solicitud de licencia o de

<sup>33</sup>LOE: Ley 38/1999, de 5 de noviembre, de Ordenación de la Edificación.

autorización administrativa para las obras. En caso de que la exigencia de licencia o autorización sea sustituida por la de declaración responsable o comunicación previa, se deberá manifestar explícitamente que se está en posesión del correspondiente proyecto o memoria justificativa.

Cuando la aplicación del presente documento no sea urbanística, técnica o económicamente viable o, sea incompatible con la naturaleza de la intervención o con el grado de protección del edificio, se podrán aplicar, bajo el criterio y responsabilidad del proyectista o del técnico que suscriba la memoria, aquellas soluciones que permitan el mayor grado posible de adecuación efectiva.

En las intervenciones en edificios existentes el proyectista deberá indicar en la documentación del proyecto si la intervención incluye o no actuaciones en la estructura preexistente.

En todo cambio de uso característico de un edificio existente (afecte a todo el edificio o a una parte del mismo) se deberán cumplir las exigencias básicas del CTE.

El CTE se compone de:

- Disposiciones generales: contiene las condiciones de aplicación general del CTE así como las exigencias básicas que deben cumplir los edificios.
- Documentos básicos: para el cumplimiento de las exigencias básicas del CTE. Se actualizan en función de los avances tecnológicos. Caracterización de las exigencias básicas y su cuantificación. Ofrecen una serie de métodos de verificación cuyo cumplimiento garantiza el cumplimiento de las exigencias básicas.

El CTE, en su documento básico HE: Ahorro de Energía sección HE1 “Limitación de la Demanda Energética” establece la caracterización y cuantificación de la misma, verificación, datos para el cálculo y procedimientos, además de las características exigibles a los productos de construcción para dar cumplimiento al presente documento.

Los productos para los cerramientos se definen mediante su conductividad térmica  $\lambda$  (W/m·K) y el factor de resistencia a la difusión del vapor de agua  $\mu$ , la densidad  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>) y el calor específico  $c_p$  (J/kg·K).

Los edificios se caracterizan, en lo que a su comportamiento térmico se refiere, a través de las propiedades higrotérmicas de los productos de construcción de su envolvente<sup>34</sup>. **Las características exigibles a los mismos son las expresadas mediante los valores de sus transmitancias térmicas.**

Es decir, únicamente contempla los aspectos en estado estacionario de su comportamiento, por lo que a la hora de calcular la demanda energética que tendrá el edificio no contempla el poder capacitivo de los mismos.

---

<sup>34</sup>Envolvente: La envolvente térmica del edificio está compuesta por todos los cerramientos que delimitan los espacios habitables con el aire exterior, el terreno u otro edificio, y por todas las particiones interiores que delimitan los espacios habitables con espacios no habitables en contacto con el ambiente exterior. La envolvente térmica podrá incorporar, a criterio del proyectista, espacios no habitables adyacentes a espacios habitables.

### 2.3.11. Limitación del consumo energético DB HE 0

El consumo energético de los edificios se limita en función de la zona climática en la que se ubique además del uso previsto del mismo.

Para el caso de edificios nuevos (o ampliaciones de edificios existentes) de uso residencial privado, el consumo energético de energía primaria no renovable del edificio (o la parte ampliada) no debe superar el valor límite  $C_{ep,lim}$  obtenido mediante la siguiente expresión:

$$C_{ep,lim} = C_{ep,base} + F_{ep,sup} / S$$

Siendo:

$C_{ep,lim}$ : valor límite del consumo energético de energía primaria no renovable para los servicios de calefacción, refrigeración y ACS, expresada en kW\*h/m<sup>2</sup>\*año, considerada la superficie útil de los espacios habitables

$C_{ep,base}$ : es el valor base del consumo energético de energía primaria no renovable, dependiente de la zona climática de invierno correspondiente a la ubicación del edificio, que toma los valores de la tabla adjunta.

$F_{ep,sup}$ : es el factor corrector por superficie del consumo energético de energía primaria no renovable, que toma los valores de la tabla adjunta.

S: es la superficie útil de los espacios habitables del edificio (o la parte ampliada) en m<sup>2</sup>

	Zona climática de invierno					
	<b><math>\alpha</math></b>	<b>A*</b>	<b>B*</b>	<b>C*</b>	<b>D</b>	<b>E</b>
$C_{ep,base}$ (kW*h/m <sup>2</sup> *año)	40	40	45	50	60	70
$F_{ep,sup}$	1000	1000	1000	1500	3000	4000
*Los valores de $C_{ep,base}$ para las zonas climáticas de invierno A, B y C de Canarias, Baleares, Ceuta y Melilla se obtendrán multiplicando los valores de $C_{ep,base}$ de esta tabla por 1.2						

Tabla 23: Valor base y factor corrector por superficie del consumo energético.

## DATOS PARA EL CÁLCULO DEL CONSUMO ENERGÉTICO

El consumo energético de los servicios de calefacción y refrigeración se obtendrá considerando las condiciones operacionales, datos previos y procedimientos de cálculo de la demanda energética establecidos en la Sección HE1 de este Documento Básico.

El consumo energético para agua caliente sanitaria (ACS) se obtendrá considerando la demanda energética resultante de la aplicación de la sección HE4 de este Documento Básico.

El consumo energético del servicio de iluminación se obtendrá considerando la eficiencia energética de la instalación resultante de la aplicación de la sección HE3 de este Documento Básico.

Cuando no se definan en proyecto equipos para un servicio de climatización se considerarán las eficiencias de los sistemas de referencia, que se indican en la siguiente tabla:

<b>Tecnología</b>	<b>Vector energético</b>	<b>Rendimiento</b>
Producción de calor	Gas natural	0.92
Producción de frío	Electricidad	2.00

Tabla 24: Eficiencia de los sistemas.

### 2.3.12. Limitación de la demanda energética DB HE 1

De aplicación en:

- Edificios de nueva construcción
- Intervenciones en edificios existentes ya sea de ampliación, reforma ( a excepción de las llevadas a cabo como mantenimiento del edificio) o cambio de uso.

Se excluyen del ámbito de aplicación edificios históricos, construcciones provisionales con un plazo previsto de uso inferior a dos años, edificios industriales, de defensa, agrícolas (o parte de los mismos), edificios aislados con una superficie inferior a 50 m<sup>2</sup>, edificaciones (o parte de las mismas) que estén abiertas de forma permanente y cambio del uso característico del edificio cuando este no suponga una modificación de su perfil de uso.

La demanda energética de los edificios se limita en función de la zona climática de la localidad en que se ubican y del uso previsto.

#### CUANTIFICACIÓN DE LA EXIGENCIA. LIMITACIÓN DE LA DEMANDA ENERGÉTICA EN EDIFICIOS NUEVOS O AMPLIACIONES DE EDIFICIOS EXISTENTES DE USO RESIDENCIAL PRIVADO.

La demanda energética de calefacción del edificio o la parte ampliada, en su caso, no debe superar el valor límite  $D_{cal,lim}$  obtenido mediante la siguiente expresión:

$$D_{cal,lim} = D_{cal,base} + F_{cal,sup} / S$$

Siendo:

$D_{cal,lim}$ : el valor límite de la demanda energética de calefacción, expresada en  $kW \cdot h/m^2 \cdot \text{año}$ , considerada la superficie útil de los espacios habitables.

$D_{cal,base}$ : es el valor base de la demanda energética de calefacción, para cada zona climática de invierno correspondiente al edificio, según tabla adjunta.

$F_{cal,sup}$ : es el factor corrector por superficie de la demanda energética de calefacción, según tabla adjunta

S: es la superficie útil de los espacios habitables del edificio, en  $m^2$

	Zona climática de invierno					
	<b><math>\alpha</math></b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>
$D_{cal,base}$ ( $kW \cdot h/m^2 \cdot \text{año}$ )	15	15	15	20	27	40
$F_{ep,sup}$	0	0	0	1000	2000	3000

Tabla 25: Valor base y factor corrector por superficie de la demanda energética de calefacción.

En edificios de uso residencial privado, los elementos de la envolvente térmica deben ser tales que eviten las descompensaciones en la calidad térmica de los diferentes espacios habitables.

La transmitancia térmica y permeabilidad al aire de los huecos y la transmitancia térmica de las zonas opacas de muros, cubiertas y suelos, que formen parte de la envolvente térmica del edificio, no debe superar los valores establecidos en la siguiente tabla:

Parámetro	Zona climática de invierno					
	<b><math>\alpha</math></b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>
Transmitancia térmica de muros y elementos en contacto con el terreno(*) ( $W/m^2 K$ )	1.35	1.25	1.00	0.75	0.60	0.55
Transmitancia térmica de cubiertas y suelos en contacto con el aire ( $W/m^2 K$ )	1.20	0.80	0.65	0.50	0.40	0.35
Transmitancia térmica de huecos(**) ( $W/m^2 K$ )	5.70	5.70	4.20	3.10	2.70	2.50
Permeabilidad al aire de huecos(***) ( $m^3/h m^2$ )	$\leq 50$	$\leq 50$	$\leq 50$	$\leq 27$	$\leq 27$	$\leq 27$
(*) Para elementos en contacto con el terreno, el valor indicado se exige únicamente al primer metro de muro enterrado, o el primer metro del perímetro de suelo apoyado sobre el terreno						

hasta una profundidad de 0.50 m.

(\*\*) Se considera el comportamiento conjunto de vidrio y marco. Incluye lucernarios y claraboyas.

(\*\*\*) La permeabilidad de las carpinterías indicadas es la medida con una sobrepresión de 100 MPa

Tabla 26: Transmitancia térmica máxima y permeabilidad al aire de los elementos de la envolvente térmica.

#### CUANTIFICACIÓN DE LA EXIGENCIA. LIMITACIÓN DE LA DEMANDA ENERGÉTICA EN EDIFICIOS NUEVOS O AMPLIACIONES DE EDIFICIOS EXISTENTES DE USO RESIDENCIAL PRIVADO

Cuando la intervención produzca modificaciones en las condiciones interiores o exteriores de un elemento de la envolvente térmica que supongan un incremento de la demanda energética del edificio, las características de este elemento se adecuarán a las establecidas en este DB.

En las obras de reforma en las que se renueve más del 25% de la superficie total de la envolvente térmica del edificio y en las destinadas a un cambio de uso característico del edificio se limitará la demanda energética conjunta del edificio de manera que sea inferior a la del edificio de referencia.

Para el resto de obras de reforma no incluidas en los apartados anteriores, los elementos de la envolvente que sean sustituidos, incorporados o modificados sustancialmente, cumplirán los valores límite establecidos en la tabla del apartado anterior

En el caso de que la intervención se ejecute sobre varios componentes de la envolvente térmica, se podrán superar los valores de transmitancia térmica de dicha tabla si la demanda energética conjunta resultante fuera igual o inferior a la obtenida aplicando los valores de la tabla a los elementos afectados.

Para la correcta aplicación de esta Sección del DB HE deben realizarse las siguientes verificaciones:

- Verificación de las exigencias de limitación de la demanda energética con los datos y solicitudes definidos en el apartado 4 del DB HE 1, utilizando un procedimiento de cálculo acorde a las especificaciones establecidas en el apartado 5.
- Cumplimiento de las condiciones relativas a los productos de construcción y sistemas técnicos expuestas en el apartado 6. **Las características exigibles a los cerramientos y particiones interiores son las expresadas mediante los valores de sus transmitancias térmicas.**
- Cumplimiento de las condiciones de construcción y sistemas técnicos expuestas en el apartado 7.

## CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

### 3.1. MONITORIZACIÓN.

#### 3.1.1. Objetivos de la monitorización.

La monitorización se presenta como un procedimiento útil tanto desde el punto de vista científico como técnico. El desarrollo de ensayos no destructivos son actualmente áreas prioritarias de estudio para la conservación de Patrimonio. Una de las líneas de investigación seguidas por los estudios de humedades son el empleo de sensores para la medida del contenido en humedad de los materiales “in situ”. Esta metodología, aunque todavía en fase de desarrollo, es ampliamente acogida ya que aporta información sobre situaciones reales e “in situ”, permitiendo así establecer diseños experimentales tomando como base variables reales. Esta metodología se hace indispensable para el estudio de edificios ya construidos.

En el presente trabajo se establecen como objetivos:

1. Diseño de un sistema de monitorización mediante sensores de bajo coste, no destructivo y capaz de registrar y almacenar datos.
2. Instalación y puesta en funcionamiento “in situ” del sistema de monitorización.
3. Registro de magnitudes físicas: temperatura y humedad.
4. Tratamiento de los datos obtenidos. Obtención de gráficos.
5. Análisis de resultados y conclusiones.

#### 3.1.2. Planeamiento de la monitorización.

La UNE-EN ISO 8990<sup>35</sup> afirma que la transmisión de calor a través de los materiales y aislantes térmicos es resultado de la combinación de los procesos de conducción, convección y radiación. En dicha normativa se exponen dos métodos para medir la cantidad de calor que pasa de un lado a otro de la probeta: la caja caliente guardada y calibrada. Ambos métodos parten de una diferencia de temperatura dada, sin tener en cuenta los mecanismos individuales de transmisión de calor.

Sin embargo, las propiedades de transmisión térmica dependen a menudo de la propia probeta, del sentido de transmisión del flujo de calor, de las temperaturas, de las diferencias de temperatura, de la velocidad del aire y de la humedad relativa. Consecuencia de ello es que, o bien las condiciones de ensayo son idénticas a las previstas en uso, o bien ser evaluadas para que los resultados sean significativos.

Debido a la variedad de estructuras a ensayar y las exigencias de las condiciones de ensayo tan diferentes, dicha normativa no establece restricciones en el método, ni limita todas las medidas a una sola configuración.

Por todo ello, tomaremos el citado documento como referente para el planteamiento experimental objeto del presente trabajo, con el inconveniente de que únicamente contempla la determinación de las propiedades de transmisión térmica para un estado estacionario, pero con

---

<sup>35</sup>UNE - EN ISO 8990 Determinación de las propiedades de transmisión térmica en régimen estacionario. Métodos de la caja caliente guardada y calibrada.

la ventaja de que no especifica detalles particulares para el diseño de los aparatos y exigencias mínimas para la determinación de las propiedades térmicas.

Los dos métodos de medición de la caja caliente guardada y calibrada son aptos tanto para probetas verticales (muros) como horizontales (forjados), siendo posible que el equipo sea tan grande como para estudiar los elementos a escala real.

Estos dos métodos están concebidos para reproducir las condiciones límite de una probeta colocada entre dos fluidos (el aire ambiente) cada uno de los cuales está a una temperatura constante. Esta es la principal diferencia con nuestro experimento, ya que en nuestro caso la fuente de calor es varía a lo largo del tiempo.

Según el ensayo establecido en la norma, se coloca una probeta entre una cámara caliente y otra fría (con la temperatura controlada) para medir las temperaturas del aire y de las superficies así como la potencia suministrada a la cámara caliente. A partir de estas mediciones, se calculan las propiedades de transmisión de la probeta (resistencia y transmitancia térmica)

En el apartado 2.7 de la referenciada norma, se establece que los elementos de medida de la temperatura del aire y de la temperatura superficial de la probeta se deben espaciar de forma regular sobre la superficie de la misma y colocarse enfrentados sobre los lados caliente y frío. El número de elementos de medida de la temperatura para cada tipo de medición será de al menos dos por metro cuadrado y como mínimo nueve, salvo que se dispongan de otras informaciones sobre el reparto de temperaturas.

Esta es la premisa de partida considerada para el diseño de la red, estableciendo así la superficie a monitorizar sobre el elemento constructivo de 1.00 m<sup>2</sup> y con nueve sensores instalados en cada una de las caras del mismo enfrentados entre sí, además de la instalación de los sensores de ambiente interior y exterior otros dos embebidos en el muro.

### 3.1.3. Diseño del experimento.

Se ha diseñado un plan de trabajo para el desarrollo del proyecto, estructurado en cinco tareas principales relacionadas directamente con los objetivos del proyecto. Estas tareas se desglosan con sus respectivas sub-tareas en la tabla adjunta además de las horas dedicadas a cada una.

Tarea	Sub-tarea	Horas
Configuración hardware	Conexión electrónica de los sensores	8
Configuración software	Instalación de Raspbian en el Raspberry Pi 2	16
Configuración hardware	Generación código con Python.	120
Configuración hardware	Pruebas y mejoras del código	24
Configuración software	Instalación de librerías.	8
Configuración software	Lectura de sensores con Python	8
Implementación	Diseño y desarrollo de la instalación	120
Implementación	Pruebas y mejoras	24



Implementación	Control de la instalación	56
Implementación	Puesta en funcionamiento de la instalación.	8
Documentación	Recopilación de los registros.	8
Documentación	Tratamiento de datos.	24
Documentación	Recopilación de información sobre las tecnologías usadas.	28
Análisis de resultados.	Redacción de la memoria.	120
	TOTAL	572

Tabla 27: Calendario de tareas del experimento (elaboración propia)

### 3.1.4.Descripción de los equipos de medida.

#### 3.1.4.1. Raspberry Pi

Se trata de un ordenador de bajo coste y tamaño similar al de una tarjeta de crédito. Se desarrolla desde 2006 en Reino Unido por la Fundación Raspberry Pi con el objetivo de promover las enseñanzas de programación y computación en los colegios.

La diferencia con un ordenador corriente radica en que no incluye cable de alimentación, disco duro ni carcasa. Se compone de una placa base sobre la cual se aloja un procesador central (CPU), un procesador gráfico (GPU) y memoria RAM. No incluye disco duro ya que utilizad una tarjeta SD o micro SD (según modelo) para el almacenamiento permanente.

Comenzó a comercializarse en febrero de 2012, al mismo tiempo que se anunciaba el modelo A el cual originalmente se había diseñado con 128 MB de RAM, aunque finalmente fue de 256 MB y lanzado en febrero de 2013.

El modelo A solo tiene un puerto USB, carece de controlador Ethernet (aunque puede ser conectada a red mediante un adaptador Ethernet-USB) y cuesta menos que el modelo B, el cual tiene dos puertos USB y controlador Ethernet 10/100. El modelo B cuenta con 512 MB de RAM en contraposición a los 256 MB del modelo A.



Fotografía 22: Raspberry Pi 2 Modelo B (elaboración propia)

El Raspberry Pi no tiene reloj en tiempo real (RTC), por lo que debe utilizar un servidor de hora en red o bien pedir al usuario la hora en el momento de arrancarla.

Permiten la utilización de teclado y ratón convencional mediante conexión USB compatible con Raspberry.

En cuanto al sistema operativo se pueden instalar varios, la mayoría basados en el núcleo de Linux. Algunos de los más conocidos son Android, Firefox OS, Raspbian, OpenWebOS o Unix. Para el nuestro proyecto utilizaremos el Raspbian, una distribución derivada de DEBIAN adaptada para el Raspberry Pi que fue lanzada en julio de 2012 y es la recomendada por la Fundación Raspberry Pi para iniciarse.

La Raspberry Pi Modelo B es la segunda generación de Raspberry Pi. Reemplazó al modelo original Raspberry Pi Modelo B+ en febrero de 2015, aunque son completamente compatibles.

Al igual que el modelo B+, se compone de:

- 4 puertos USB
- 40 pins GPIO
- Puerto HDMI
- Puerto Ethernet
- Ranura micro SD
- Conector de audio 3.5 mm combinado con video.
- Interfaz de cámara (CSI)
- Interfaz de pantalla (DSI)

Pero además:

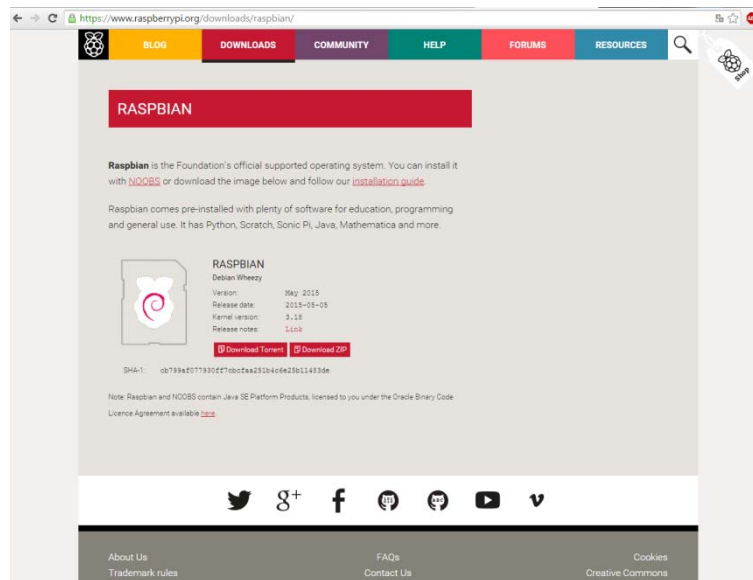
- Procesador 900MHz quad-core ARM Cortex-A7 CPU
- 1GB RAM

## CONFIGURACIÓN DEL RASPBERRY PI

Para comenzar a trabajar con la placa, se necesita una tarjeta micro SD, fuente de alimentación, pantalla, teclado y cable HDMI.

La tarjeta micro SD pasa a hacer la función de disco duro del dispositivo. En ella se instala el sistema operativo, en este caso Raspbian en su versión 3.18, el cual está disponible para descarga desde la propia web de Raspberry a través del siguiente link (<https://www.raspberrypi.org/downloads/raspbian/>)

Para abrir la imagen de Raspbian se utilizó WIN32 Disk Imager, igualmente disponible para descargar desde la web del autor (<http://sourceforge.net/projects/win32diskimager/>). El proceso puede tardar entre 2 y 5 minutos. Una vez hecho esto, se la tarjeta micro SD la cual está lista para utilizarse en el Raspberry Pi.



Fotografía 23: Web de la Fundación Raspberry Pi.

Una vez descargado el sistema operativo en la tarjeta, se procede a la conexión del teclado, monitor y alimentación y se inicia la configuración inicial del Raspberry Pi 2.

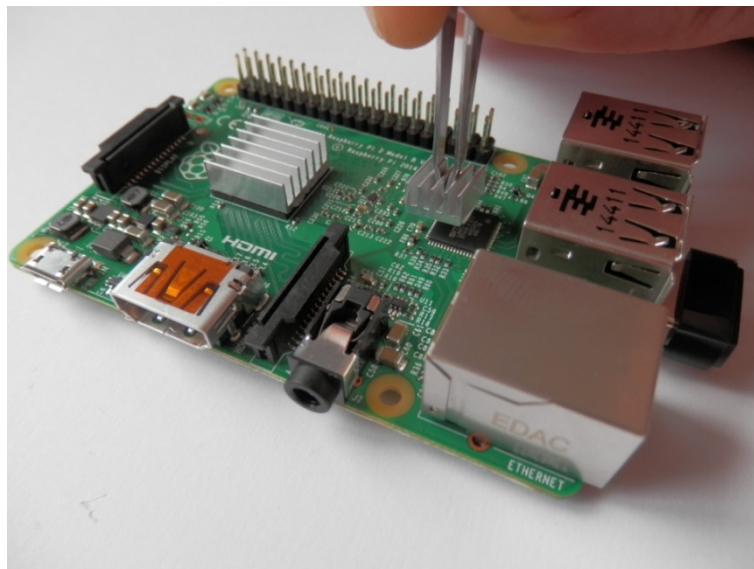


Fotografía 24: Tarjeta micro SDCH 16 Gb Class 4 con adaptador SD y Cable HDMI 1.4 macho a macho 2.00 m (elaboración propia)



Fotografía 25: Fuente de alimentación micro USB 5V DC 2.1 A y teclado ([www.cetronic.es](http://www.cetronic.es))

Debido a que el dispositivo de registro de datos permanecerá conectado durante largos períodos de tiempo a fin de evitar el recalentamiento del mismo se instalan dos disipadores de calor.



Fotografía 26: Instalación de los disipadores (elaboración propia)



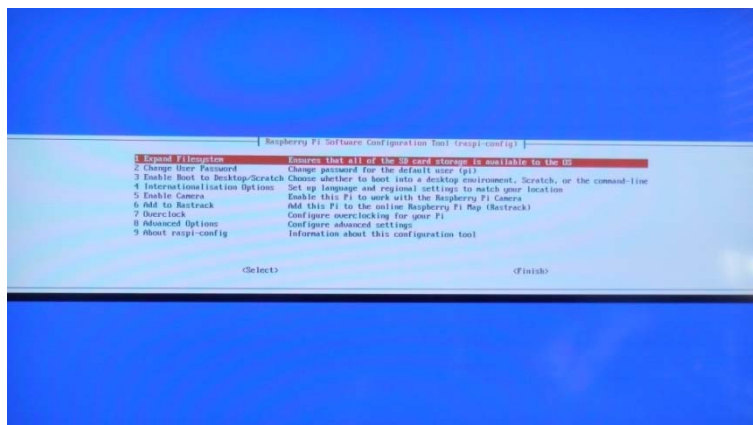
Fotografía 27: Conexión de la Raspberry Pi 2 (elaboración propia)

## INSTALACIÓN Y CONFIGURACIÓN DE RASPBIAN 3.18

Una vez ensamblada la tarjeta micro SD en el Raspberry Pi 2, el cable HDMI y teclado conectado a la placa, se conecta la fuente de alimentación del dispositivo. Lo primero que se muestra es la pantalla de carga del sistema operativo. Esta operación, como es la primera vez se realiza, puede tardar unos minutos.



Fotografía 28: Pantalla arranque RPI2. (elaboración propia)



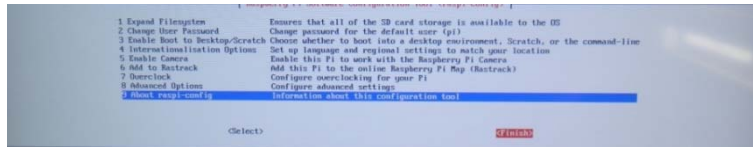
Fotografía 29: Pantalla configuración SO en RPI2 (elaboración propia)

### Opciones de configuración del sistema operativo<sup>36</sup> (SO)

- Expand Filesystem (expandir el sistema operativo): la imagen del sistema operativo Raspbian 3.18 ocupa 3.05 GB, pero en este caso se dispone de una tarjeta de 16 GB por lo que se decide adoptar esta opción para cambiar el tamaño del sistema operativo.
- Change user Password: Por defecto, la Raspberry Pi 2 (RPI2)<sup>37</sup> trae como usuario por defecto "Pi" y como contraseña "Raspberrry". Siempre es recomendable cambiarlo a uno personalizado por motivos de seguridad.
- Enable Boot to Desktop/Scratch: con esta opción se indica al Raspberry Pi que arranque directamente al escritorio en vez de a la consola de comandos. En nuestro caso se mantuvo sin modificaciones.
- Internationalisation Options: Se define el idioma del teclado, tipo, etc. En nuestro caso:  
Configuración teclado: idioma ES\_ES.UTF-8 UTF-8  
Teclado 104-generic  
Time zone: Madrid
- Enable Camera: opciones de habilitación en caso de que existiese alguna cámara conectada al dispositivo.
- Add to Rastrack: es un registro de Raspberry's en línea creado por la Fundación Raspberry Pi para conocer la activación de cada nuevo dispositivo. Es opcional.
- Overclock:
- Advanced Options: opciones de pantalla, hostname, cantidad de memoria gráfica disponible, habilitar la consola remota a través de SSH, activar la interfaz SPI, habilitar I2C, habilitar el puerto serie, forzar al que el audio salga a través del cable HDMI y una opción de actualización a la última versión.

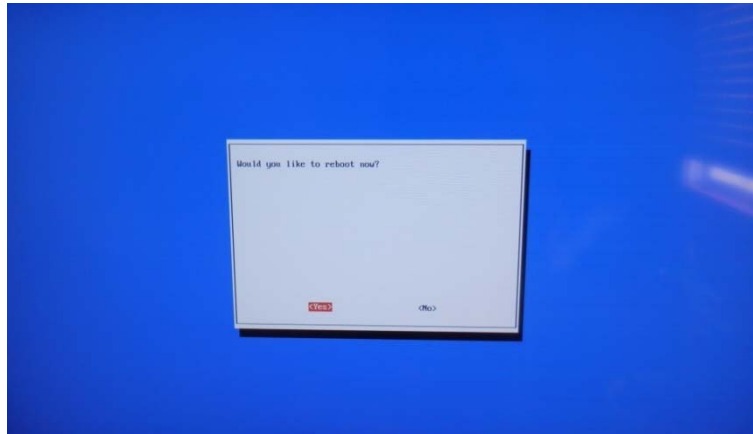
<sup>36</sup> SO: acrónimo para Sistema operativo.

<sup>37</sup> RPI2: Acrónimo para Raspberry Pi 2 el cual emplearemos de aquí en adelante para referirnos al dispositivo.



Fotografía 30: Opciones de configuración SO Raspbian (elaboración propia)

Finalmente, para abandonar las opciones de configuración se selecciona mediante la tecla "Tab" <Finish>



Fotografía 31: Fin configuración SO. Reinicio del RPI 2 (elaboración propia)

Una vez reiniciado el RPI2, para acceder a la misma nos pedirá nuestra contraseña, en caso de que la hubiésemos modificado, sino se indicará la que viene por defecto "raspberrypi"

Algunos comandos útiles:

Para actualizar las definiciones de paquetes de apt-get:

```
raspberrypi ~ $ sudo apt-get update
```

Para actualizar a los últimos paquetes del RP2:

```
raspberrypi ~ $ sudo apt-get upgrade
```

Para regresar al menú de configuración:

```
raspberrypi $ sudo raspi-config
```

Para entrar a la interfaz gráfica:

```
raspberrypi ~ $ startx
```

Para apagar nuestro RPI2:

```
raspberrypi ~ $ sudo init 0
```

PYTHON

Python es un lenguaje de programación de código abierto. Fue diseñado para ser leído con claridad. Utiliza palabras donde





otros lenguajes utilizan símbolos como por ejemplo el operador lógico && en Python se escribe and.

El contenido de los bloques de código se delimita mediante espacios o tabuladores (aunque conviene no mezclarlos), conocidos como indentación, antes de cada línea de órdenes pertenecientes al bloque diferenciándose así de otros lenguajes de programación que mantienen como costumbre declarar los bloques mediante un conjunto de caracteres, normalmente entre llaves {}.

Como prerequisites a la instalación de Python 3.4:

Se actualizarán los últimos paquetes de nuestra RP2:

```
raspberrypi~ $ sudo apt-get update
```

```
raspberrypi~ $ sudo apt-get upgrade -y
```

```
raspberrypi~ $ sudo apt-get install build-essential libncursesw5-dev libgdbm-dev libc6-dev
```

Se procede a la instalación de SQLite, sistema de gestión de bases de datos relacional.

```
raspberrypi~ $ sudo apt-get install zlib1g-dev libsqlite3-dev tk-dev
```

```
raspberrypi~ $ sudo apt-get install libssl-dev openssl
```

Instalación de Python 3.4

```
raspberrypi~ $ cd ~
```

```
raspberrypi~ $ wget https://www.python.org/ftp/python/3.4.2/Python-3.4.2.tgz
```

```
raspberrypi~ $ tar -zxvf Python-3.4.2.tgz
```

```
raspberrypi~ $ cd Python-3.4.2 $ ./configure
```

```
raspberrypi~ $ make
```

```
raspberrypi~ $ sudo make install
```

El proceso de instalación de Python 3.4.2 puede llevar en torno a unos 30 minutos dependiendo del tipo de conexión a internet disponible.

En este proyecto se han creado dos scripts en formato Python para gestionar los sensores conectados al RPI2.

Previo al conexionado de los diferentes sensores a nuestro RPI2, se debe tener en cuenta la identificación de cada uno de los 40 pines de los que dispone, según esquema adjunto:



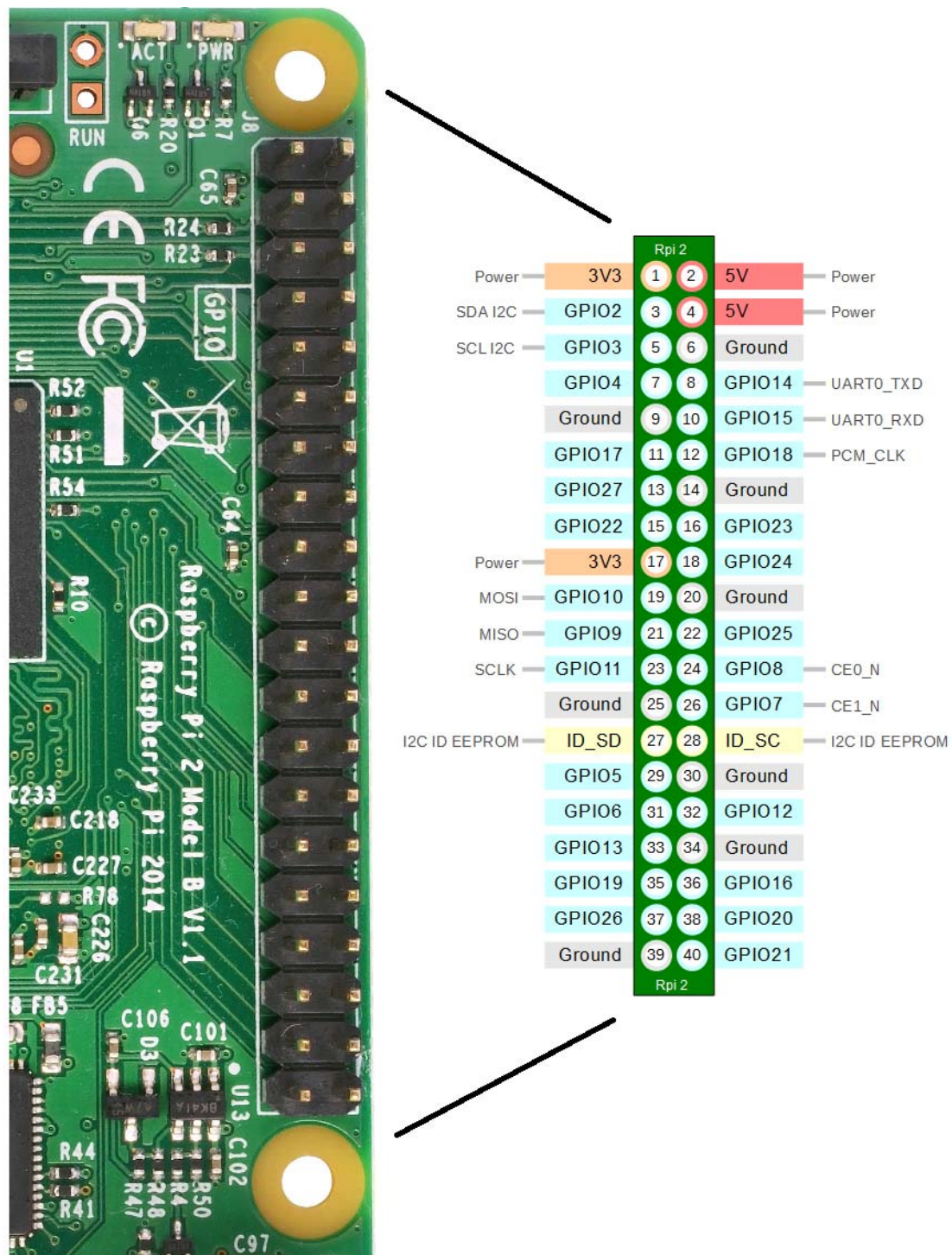


Ilustración 18: Raspberry Pi2 GPIO header ([www.dynamoelectronics.com](http://www.dynamoelectronics.com))

### 3.1.4.2. Sensores

Para el presente estudio experimental, se han utilizado dos tipos de sensores:

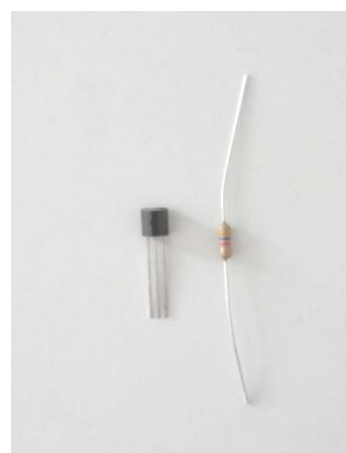
#### DALLAS DS18B20

El DS18B20 es un termómetro digital de pequeñas dimensiones y resolución programable que se comunica a través de una interfaz serie 1-Wire® con un microprocesador.

Fabricado por Maxim, cada sensor posee un código de 64 bits que permite conectar varios sensores en paralelo utilizando una única patilla de datos.

No precisa de fuente de alimentación externa ya que puede funcionar en modo parásito, es decir, coger la energía de la línea de datos.

Entre sus aplicaciones se incluyen controles termostáticos, sistemas de climatización y sistemas de control de temperatura en el interior de edificios, maquinaria y equipos.



Fotografía 32: : DS18b20 y resistencia pull-up de 4.7 Kohm (elaboración propia)

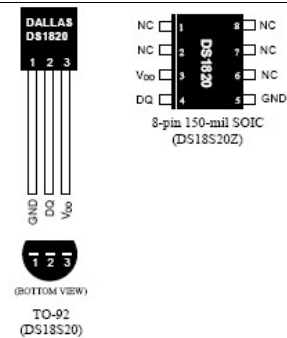
			PIN	NOMBRE	FUNCIÓN
			1	GND	Conexión a tierra.
			2	DQ	Pin de interface. También sirve como alimentación cuando se utiliza en modo parasitario.
			3	VDD	Se conecta a tierra cuando funciona en modo parasitario a alimentación en modo normal.

Tabla 28: Descripción PINs sensor DALLAS DS18b20 (elaboración propia)

El DS18B20 utiliza exclusivamente el protocolo de bus de datos de 1 hilo (1-Wire) de Maxim, cada sensor posee en ID de 64 bits que le identifica de forma inequívoca por lo que permite la conexión de múltiples sensores a un solo pin digital con una resistencia pull-up de 4.7 Kohm.

Altura	4.95mm
Ancho	3.94mm
Conteo de Pines	3
Dimensiones	4.95 x 3.94 x 4.95mm

Longitud	4.95mm
Precisión	$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$
Resolución	12 bits
Temperatura de Funcionamiento Mínima	-55 °C
Temperatura Máxima de Funcionamiento	+125 °C
Tensión de Alimentación de Funcionamiento Mínima	3 V
Tensión de Alimentación Máxima de Funcionamiento	5,5 V
Tipo de Encapsulado	TO-92
Tipo de Interfaz	Serial
Tipo de Montaje	Montaje en orificio pasante
Tipo de Salida	Digital

Tabla 29: Características técnicas sensor DALLAS DS18B20([www.RS-online.com](http://www.RS-online.com))

Existe una versión encapsulada para el DS18B20 la cual permite su uso en exterior o sumergido en líquidos. Viene con tres cables, siendo el rojo voltaje, negro tierra y amarillo datos.



Fotografía 33: Sensor DS18B20 encapsulado (elaboración propia)

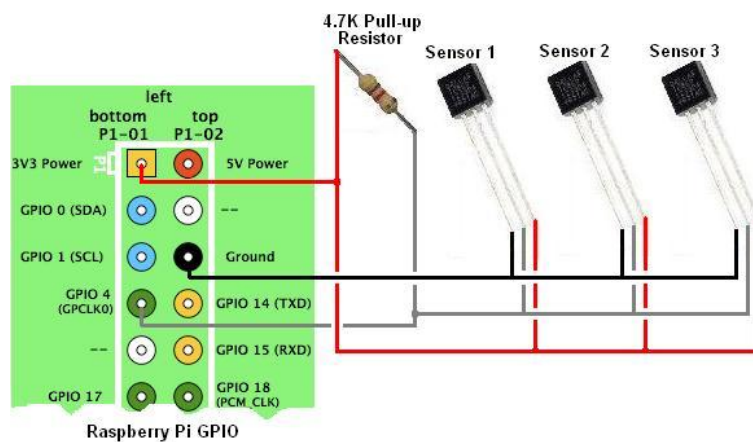
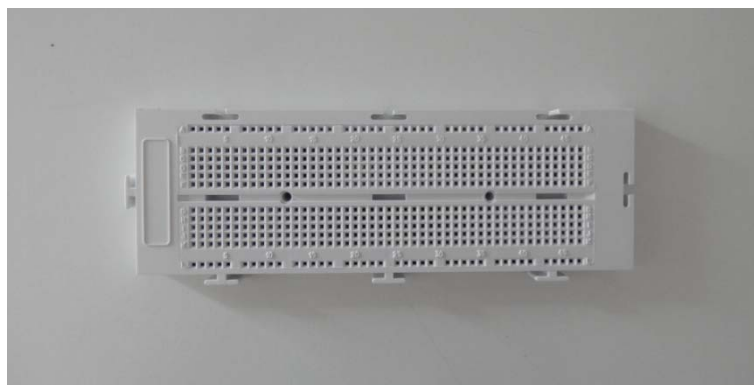


Ilustración 19: Esquema conexión de varios DS18B20 a la RPI (REUK.co.uk)

Para proceder con la conexión de los sensores en bus según esquema de la figura 50, se hace necesario un breakout que permita la utilización los 40 pines de la RP2 directamente en una placa de prototipado, además de jumpers de conexión macho.



Fotografía 34: Placa protoboard 150\*50 mm (elaboración propia)

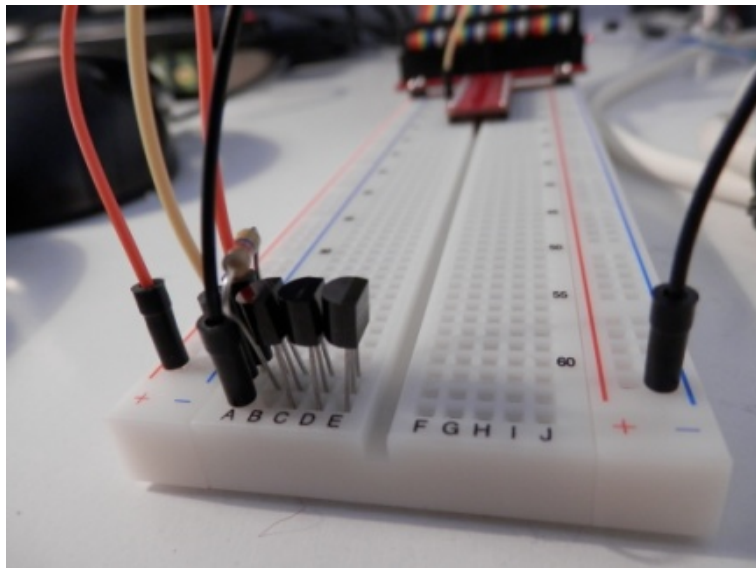


Fotografía 35: Cobbler Breakout, (www.cetronic.es)



Fotografía 36: Jumpers de conexion ([www.cetronic.es](http://www.cetronic.es))

Una vez conectados los sensores, se realiza una test de funcionamiento con 3, previa a la instalación definitiva de los mismos. Para efectuar la lectura de los sensores se siguen los siguientes pasos:



Fotografía 37: Sensores DS18B20 conectado en bus a placa protoboard (elaboración propia)

1. En nuestro caso se dispone de un RPi2, con kernel 3.18, por lo que, se debe editar el siguiente fichero como sigue:

```
raspberrypi ~ $ sudo nano /boot/config.txt
```

Al final del mismo se añade:

```
dtoverlay=w1-gpio, gpiopin=4
```

Es decir, se establece el GPIO de datos del RPi2 que se utilizará para el conexionado de los sensores.

En este momento, para que los cambios surtan efecto, se debe reiniciar el RPi2.

2. Una vez reiniciado de nuevo, se ejecutarán los siguientes comandos:



```
raspberrypi ~ $ sudo modprobe wl-gpio
```

```
raspberrypi ~ $ sudo modprobe wl-therm
```

3. Accederemos al directorio `cd` y se lista su contenido:

```
cd /sys/bus/wl/devices
```

```
ls
```

Aparecerán todos los sensores que tengamos conectados, identificados con un número de serie de la forma 28-XXXXXX

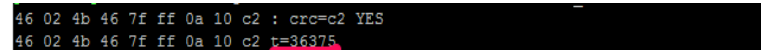


```
pi@raspberrypi ~ $ ls -l /sys/bus/wl/devices/
total 0
lrwxrwxrwx 1 root root 0 ago  5 19:18 28-03150235ceff -> ../../../../
master1/28-03150235ceff
lrwxrwxrwx 1 root root 0 ago  5 19:14 28-0315023c75ff -> ../../../../
master1/28-0315023c75ff
lrwxrwxrwx 1 root root 0 ago  5 19:18 28-0415022d2eff -> ../../../../
master1/28-0415022d2eff
lrwxrwxrwx 1 root root 0 ago  5 19:14 wl_bus_master1 -> ../../../../d
master1
```

Fotografía 38: Identificación sensores DS18b20 en RPI2 (elaboración propia)

4. La lectura de cada uno de ellos se obtiene mediante el comando:

```
raspberrypi ~ $ cat /sys/bus/wl/devices/28-03150235ceff/wl_slave
```



```
46 02 4b 46 7f ff 0a 10 c2 : crc=c2 YES
46 02 4b 46 7f ff 0a 10 c2 t=36375
```

Fotografía 39: Lectura sensor DS18b20 en RPI2 (elaboración propia)

En la que el valor de `t` es la temperatura, en grados centígrados, pero multiplicada por mil.

De esta forma se consigue verificar que el/los sensor/es funcionan, pero no es una forma válida de operarlo de una forma continuada, por lo que se diseña un script en Python para cada uno de los sensores de la instalación. A continuación se muestra el realizado para el sensor 28-03150235ceff.

Este script se ejecutará cada 600 s, es decir 10 minutos, para tomar una lectura del sensor establecido en el código y posteriormente escribirlo en un archivo formato `.csv` el cual se almacenará en un pendrive.

```

import time, datetime, glob

log_periord = 600 # Intervalo de lectura

loggin_folder = glob.glob('/media/*') [0]
dt = datetime.datetime.now()
file_name = "temp_log_ceff(:%Y_%m_%d).csv .format(dt)
loggin_file = logging_folder + '/' + file_name

print("Logging to: " + logging_file)

while 1:

    tempfile = open ("/sys/bus/w1/devices/28-03150235ceff/w1_slave")
    thetext = tempfile.read()
    tempfile.close()
    tempdata = thetext.split("\n")[1].split(" ") [9]
    temperature = float(tempdata[2:])
    temperature = temperature / 1000
    print temperature

    #time.sleep(1)

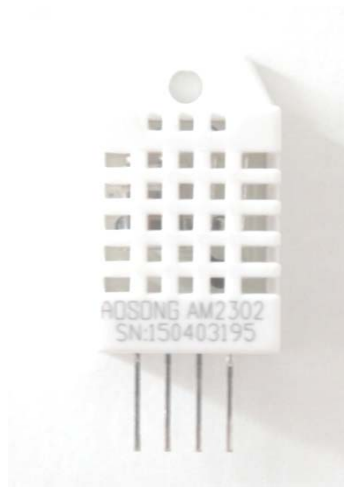
    dt = datetime.datetime.now()
    f = open(logging_file, 'a')
    f.write ("\n" {:%H: %M: %S}", ' .format(dt))
    f.write(str(temperature))
    f.close()
    time.sleep(log_perid)

```

Ilustración 20: Script sensor DALLAS DS18B20 (elaboración propia)

## DHT22

El DHT22 es un sensor digital de temperatura y humedad de bajo coste. Es un sensor de humedad capacitivo mientras que para medir la humedad utiliza un termistor.




Fotografía 40: Sensor humedad y temperatura DHT22 (elaboración propia)

Presenta como principal inconveniente que su tiempo de respuesta es de 2 s, aunque para el caso que nos ocupa es más que suficiente. A diferencia de su predecesor (el DHT11) permite registrar valores negativos de temperatura así como aproximación a la décima de grado.

Altura	18 mm
Ancho	14 mm
Conteo de Pines	4
Dimensiones	18 x 14 x 5.5 mm
Tiempo de respuesta	2 s
Precisión temperatura	$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$
Precisión humedad	2-5%
Rango de temperaturas	-40 a 80 $^{\circ}\text{C}$
Rango de humedades	0 - 100 %
Tensión de Alimentación de Funcionamiento Mínima	3 V
Tensión de Alimentación Máxima de Funcionamiento	5,5 V
Tipo de Salida	Digital

Tabla 30: Características técnicas sensor DHT22 (elaboración propia)



	PIN	NOMBRE	FUNCIÓN
	1	VCC	Alimentación
	2	DATA	Datos
	3	NC	No conectado
	4	GND	Conexión a tierra.


	1	GND	Conexión a tierra.
	2	DATA	Datos
	3	NC	No conectado

Tabla 31: Descripción PINs sensor DHT22 (elaboración propia)

Este tipo de sensor, a diferencia de los DS18B20, necesita cada uno un pin de datos independiente, por lo que la limitación del número de sensores conectados dependerá del número de GPIOs disponibles en nuestro RPI2.

Necesitan además una resistencia pull-up, pero en este caso de 10Kohm entre el pin de datos y la alimentación del sensor.

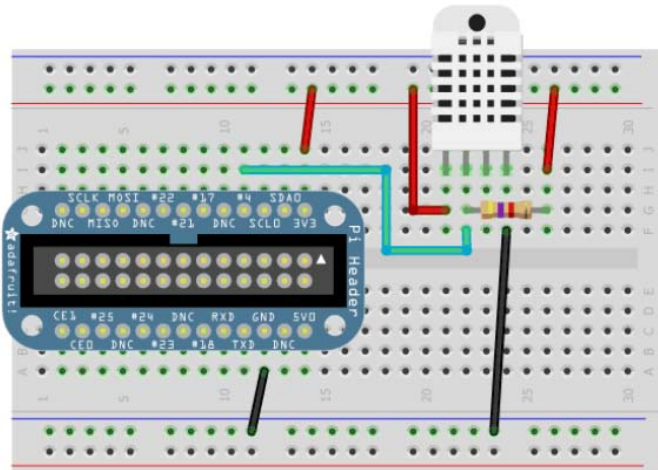
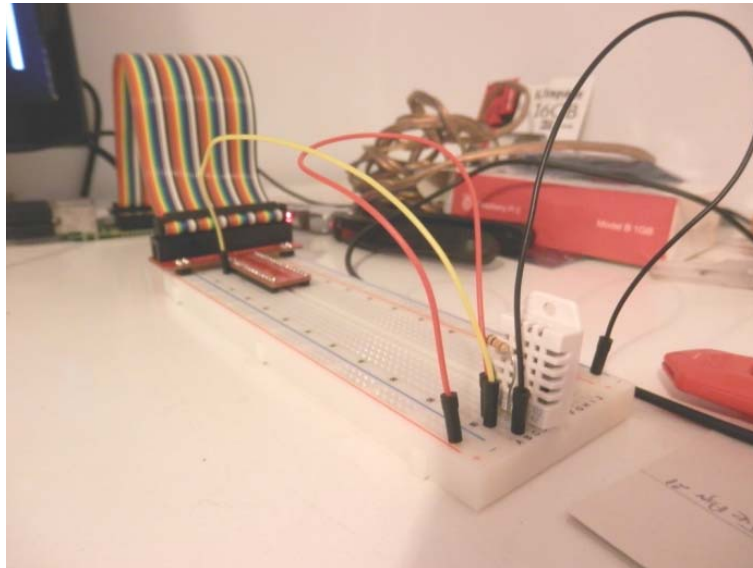


Ilustración 21: Esquema conexión de DHT22 (www.Adafruit.com)



Fotografía 41: Conexión DHT22 en protobase (elaboración propia)

Una vez conectado el sensor según el esquema adjunto se procede a la descarga de las librerías que nos permitirán acceder al mismo.

PIGPIO es una librería en C para Raspberry que permite el control de los GPIO. Está disponible en <http://abyz.co.uk/rpi/pigpio/>

En nuestro caso, como el RPI está conectado a la red, para la descarga simplemente se escribe en el terminal del RPI2:

```
raspberrypi ~ $ wget http://abyz.co.uk/rpi/pigpio/pigpio.zip
```

Una vez descargados los paquetes, se descomprimen mediante el comando:

```
raspberrypi ~ $ unzip pigpio.zip
```

Entramos en el directorio PIGPIO mediante el comando:

```
raspberrypi ~ $ cd PIGPIO
```

```
raspberrypi ~ $/PIGPIO $ make
```

```
raspberrypi ~ $/PIGPIO $ make install
```

```
raspberrypi ~ $/PIGPIO $ sudo python3 setup.py install
```

Esto permitirá el uso de estos paquetes en Python 3.

Una vez finalizado el proceso, nuevamente desde la web <http://abyz.co.uk/rpi/pigpio/>, en el menú "Examples", submenú "Python code" y se descarga el paquete correspondiente al sensor DHT22, para almacenarlo en el RPI2.



Ilustración 22: The pigpio library (<http://abyz.co.uk/rpi/pigpio/>)

Para acceder a los GPIO, simplemente se escribirá en el terminal del RPI2:

```
raspberrypi ~ $/PIGPIO $ cd ..
```

```
raspberrypi ~ $ sudo pigpiod
```

Accedemos a la interfaz gráfica de nuestro RPI2 y una vez allí se inicia Python, donde se crea el script de lectura para el sensor. En el ejemplo que sigue, se creó un script para la lectura de un DHT22 conectado al GPIO 6, que realizará un registro cada 600 segundos, es decir, 10 minutos.

Salvamos el archivo y lo ejecutamos pulsando F5.

```

import pigpio
import DHT22
from time import sleep

import time, datetime, glob

log_periord = 600 # Intervalo de lectura

logging_folder = glob.glob('/media/*') [0]
dt = datetime.datetime.now()
file_name = "temp_hum_log_6_b(:%Y_%m_%d).csv .format(dt)
logging_file = logging_folder + '/' + file_name

print("Logging to: " + logging_file)

#Inicia GPIO para pigpio
pi = pigpio.pi()
#Configuración del sensor
dht22 = DHT22.sensor(pi, 6) # Indicamos el GPIO de la RPI2 que utilizará el sensor
dht22.trigger()

sleepTime = 0

def readDHT22() :
    # Nueva lectura
    dht22.trigger()
    #Guardar registros de lectura
    humidity = "%.2f" % (dht22.humidity())
    temp = "%.2f" % (dht22.temperature())
    return (humidity, temp)

while True:
    humidity, temperature = readDHT22()
    print("Humidity is: " + humidity + "%")
    print("Temperature is: " + humidity + "°C")
    sleep(sleepTime)

#time.sleep(1)

```

Ilustración 23: Script sensor DHT22(elaboración propia)

```

*Python Shell*
File Edit Shell Debug Options Windows Help
Temperature is: 24.80C
Humidity is: 55.50%
Temperature is: 24.80C
Humidity is: 56.70%
Temperature is: 24.80C
Humidity is: 55.20%
Temperature is: 24.80C
Humidity is: 55.40%
Temperature is: 24.80C

```

Fotografía 42: Ejecución script para sensor DHT22 (elaboración propia)

### 3.2. INSTALACIÓN DE LOS SENSORES

Según las consideraciones establecidas en el apartado 3.1.3 "Diseño del experimento" en cuanto al número de sensores a instalar y la disposición de los mismos, se presentan los esquema de disposición de los sensores como sigue:

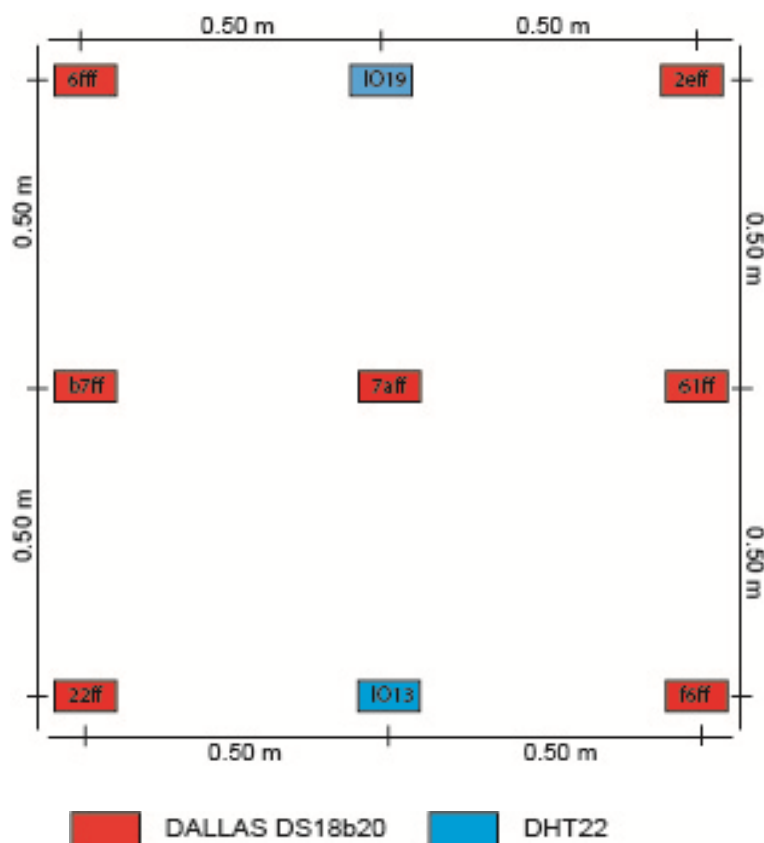


Ilustración 24: Esquema instalación sensores (interior) (elaboración propia)

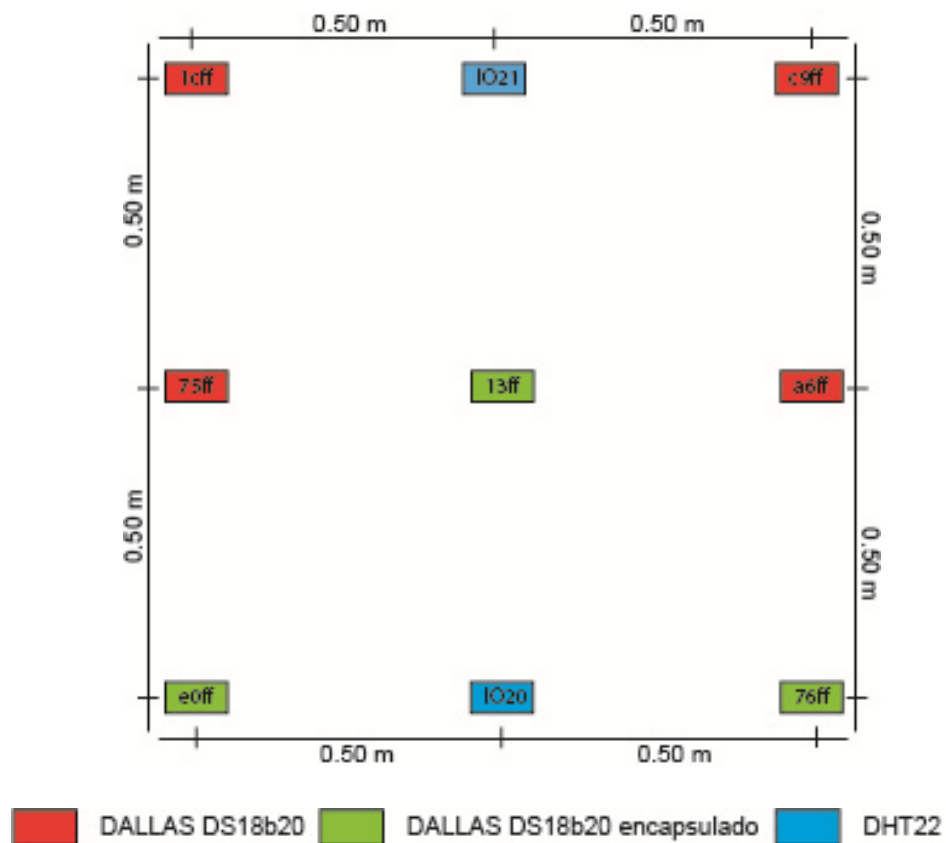


Ilustración 25: Esquema instalación sensores exterior (elaboración propia).

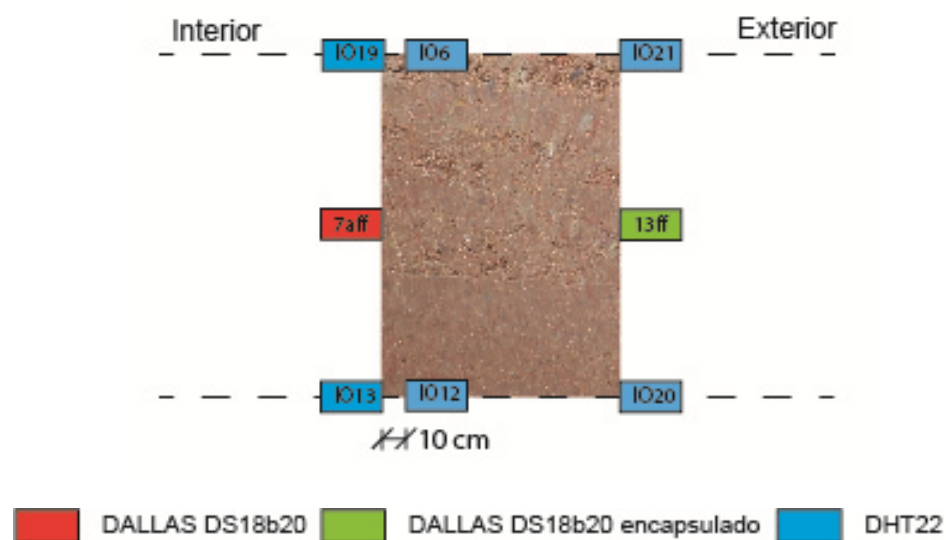
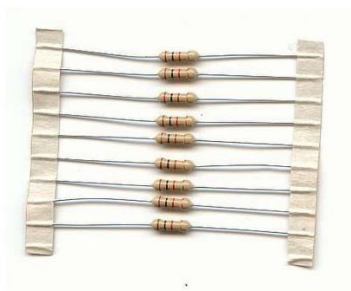


Ilustración 26: Esquema instalación sensores interior muro (elaboración propia)

Materiales necesarios para la instalación:



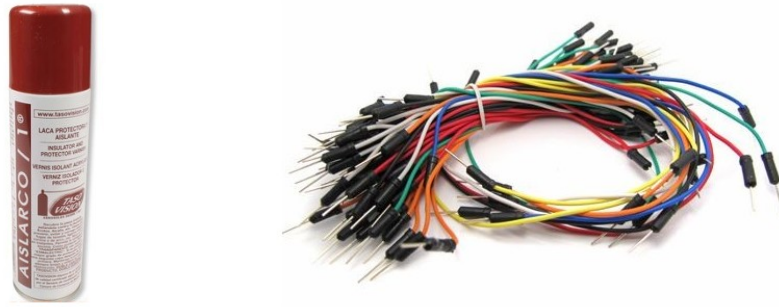
Fotografía 43: Resistencia 4.7 y 10 Koh, estaño y polímetro ([www.cetronic.es](http://www.cetronic.es) y elaboración propia)



Fotografía 44: Tenaza pelacables, soldador eléctrico de 40 W y cable data YCY 4\*0.22 mm ([www.cetronic.es](http://www.cetronic.es))



Fotografía 45: Taladro, cinta aislante y bridas reutilizables (elaboración propia)



Fotografía 46: Laca acrílica protectora y aislante y jumpers conexión protoboard machos  
([www.cetronic.es](http://www.cetronic.es))

### 3.1.5. Instalación interior

El proceso comenzó con la delimitación del cuadrado de 1 .00 \* 1.00 m en el interior de la vivienda en cuyos vértices y puntos centrales de cada lado y del propio cuadrado se instalarán los sensores:



Fotografía 47: Área interior de instalación de los sensores (elaboración propia)





Fotografía 48: Área interior de instalación de los sensores (elaboración propia)

Como se puede apreciar en la imagen superior, el área delimitada se encuentra próxima al punto de encuentro del cerramiento objeto de análisis con la fachada principal del edificio. Para evitar la influencia de posibles puentes térmicos, se ha respetado una distancia a la misma igual al espesor del cerramiento, es decir 70 cm.

No fue posible el desplazamiento del área de monitorización exterior debido al con la cubierta de la vivienda anexa. Se trata de una cubierta inclinada a dos aguas, por lo que en caso de efectuar dicho desplazamiento en el interior, el área análoga del cerramiento por la cara exterior quedaría oculta por la construcción vecina.



Fotografía 49: Cerramiento monitorizado. Vista exterior ( elaboración propia )

Una vez establecido el área, se procede con la identificación de cada uno de los sensores. Para el caso de los DALLAS DS18B20, se identifica cada uno de ellos de manera independiente en el RPI2 mediante la codificación:

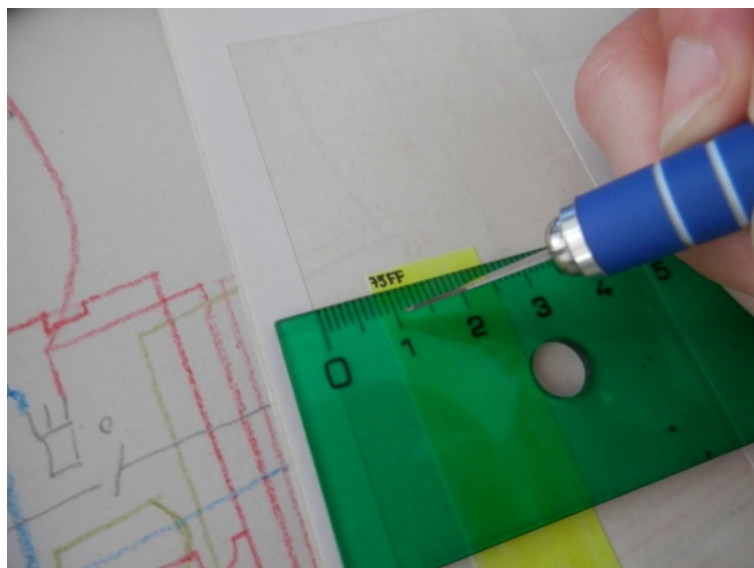
```
raspberrypi ~ $ sudo modprobe wl-gpio  
raspberrypi ~ $ sudo modprobe wl-therm  
  
cd /sys/bus/w1/devices  
  
ls
```

Una vez ejecutados mostrarán todos los sensores conectados, identificados con un número de serie de la forma 28-XXXXXX

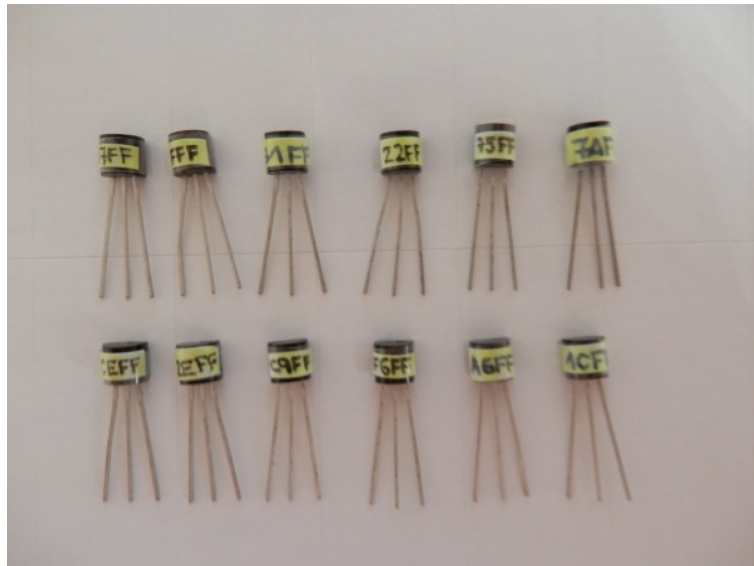
```
pi@raspberrypi ~ $ ls -l /sys/bus/w1/devices/  
total 0  
lrwxrwxrwx 1 root root 0 ago  5 19:18 28-03150235ceff -> ../../..  
_master1/28-03150235ceff  
lrwxrwxrwx 1 root root 0 ago  5 19:14 28-0315023c75ff -> ../../..  
_master1/28-0315023c75ff  
lrwxrwxrwx 1 root root 0 ago  5 19:18 28-0415022d2eff -> ../../..  
_master1/28-0415022d2eff  
lrwxrwxrwx 1 root root 0 ago  5 19:14 w1_bus_master1 -> ../../..  
_master1
```

Fotografía 50: Identificación sensores DS18B20 (elaboración propia)

Se adopta como código identificativo para cada uno de ellos el correspondiente a las cuatro últimas cifras y/o letras del código de referencia que le es propio, obteniendo así:

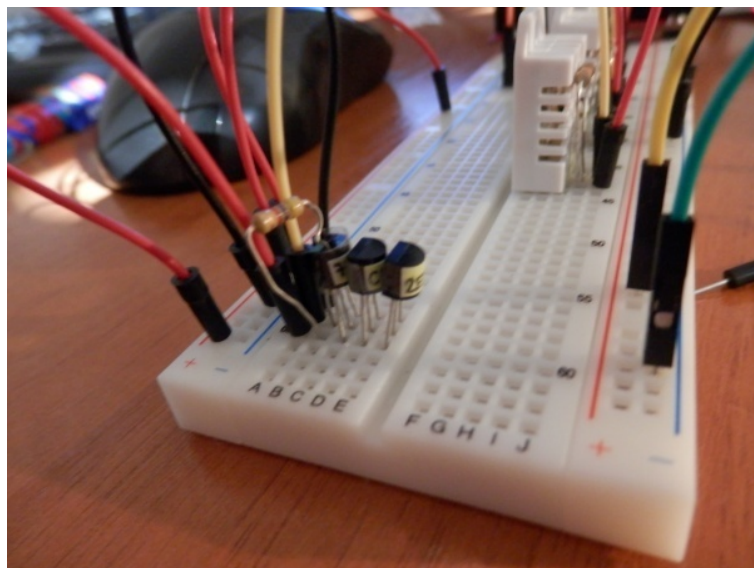


Fotografía 51: Etiquetado sensores DALLAS DS18B20 (elaboración propia)

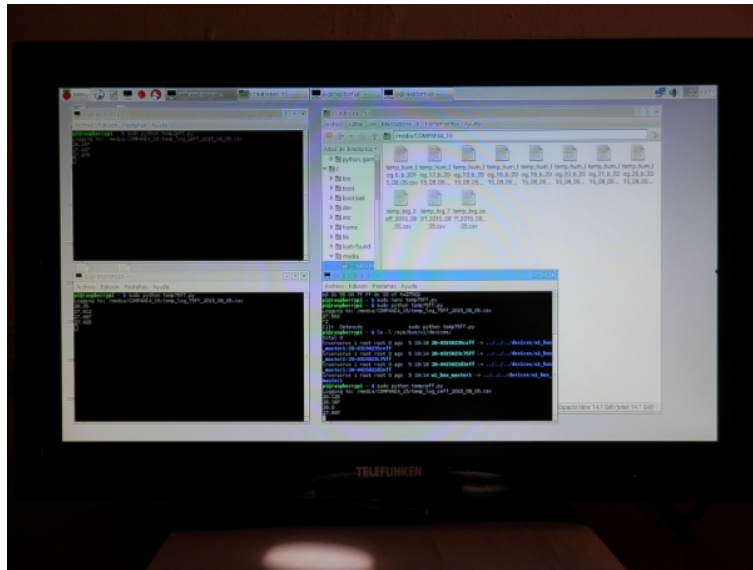


Fotografía 52: Sensores DALLAS DS18b20 identificados y etiquetados (elaboración propia)

Una vez identificados y etiquetados, y previa a la instalación de los mismos, se verifica el funcionamiento de cada uno de ellos y del script, además de contrastar que las lecturas arrojadas son correctas:

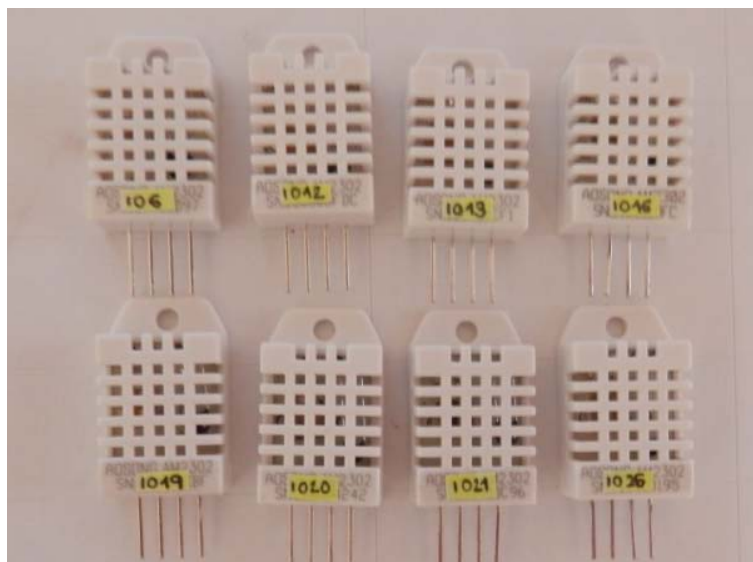


Fotografía 53: Conexión de sensores DS18b20 en placa protoboard (elaboración propia)



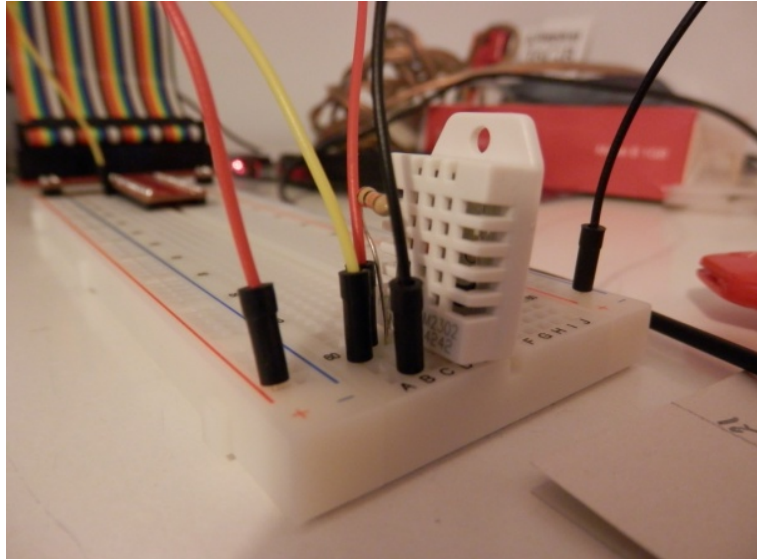
Fotografía 54: Prueba de funcionamiento de los sensores DALLAS DS18B20 (elaboración propia)

Para el caso de los sensores DHT22, debido a que cada uno de ellos necesita un pin de conexión de datos propio es decir, no permiten el conexionado en bus como los DALLAS DS18B20, la identificación de cada uno de ellos se realiza en función del GPIO del RPI 2 al que se conecten, adoptando como nomenclatura IO + N° GPIO correspondiente.



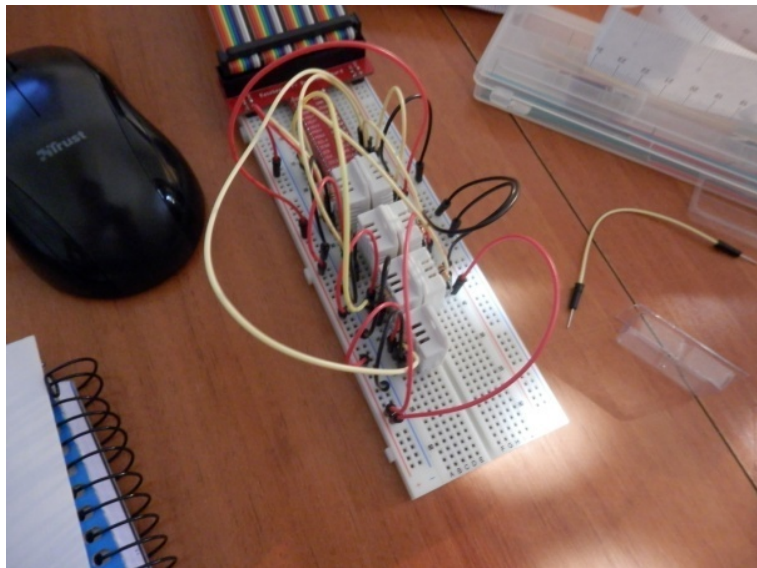
Fotografía 55: Sensores DHT22 identificados y etiquetados (elaboración propia)



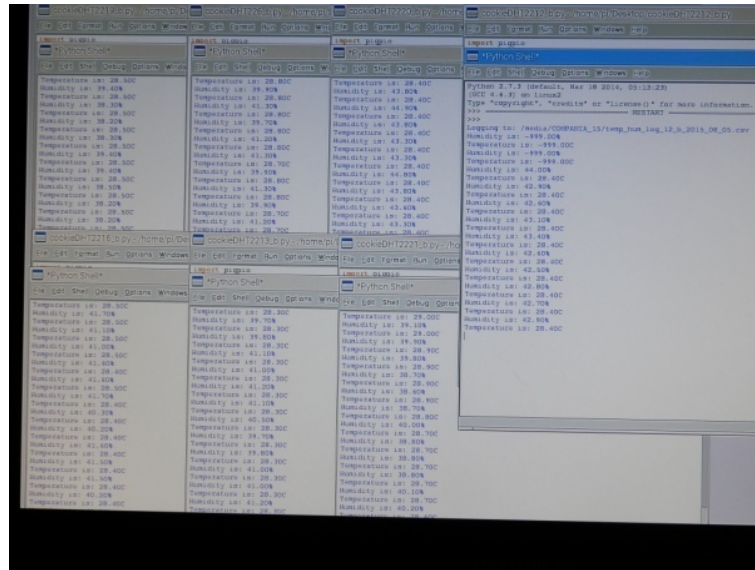


Fotografía 56: Conexión DHT22 en placa protoboard (elaboración propia)

De la misma manera que en el caso de los DS18B20, se procede al conexionado y puesta en funcionamiento de los mismos en la placa protoboard a fin de verificar el funcionamiento de los sensores, la bondad de las mediciones arrojadas y el correcto funcionamiento del script.



Fotografía 57: Verificación del funcionamiento de los sensores DHT22 (elaboración propia)

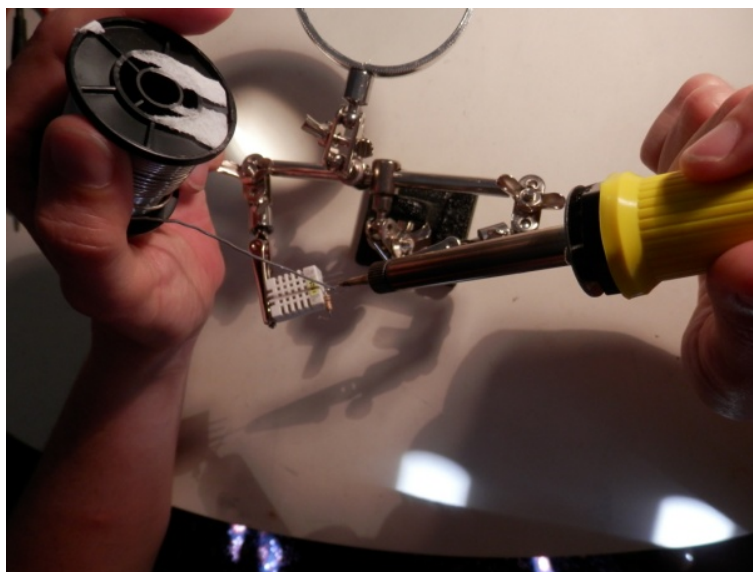


Fotografía 58: Verificación del funcionamiento de los sensores DHT22 (elaboración propia)

Dado que cada uno de estos sensores necesitan una resistencia pull-up propia, se opta por soldar cada una de ellas entre los pines de alimentación y datos de cada sensor a fin de evitar futuras molestias o posibles despistes que produjesen errores en la toma de datos.



Fotografía 59: Soldado de resistencias en sensor DHT22 (1) (elaboración propia)

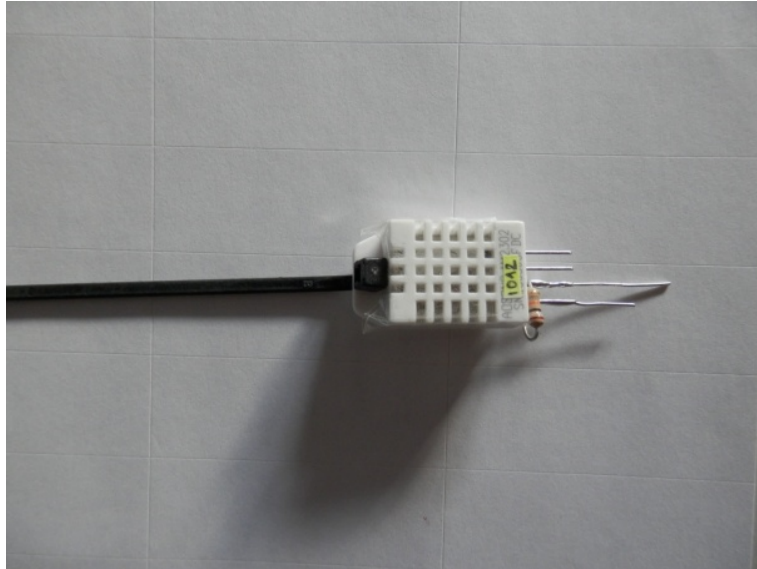


Fotografía 60: Soldado de resistencias en sensor DHT22 (2) (elaboración propia)

Una vez identificados todos los sensores y soldadas las resistencias de los DHT22 se procede a la instalación de los mismos en el cerramiento, comenzando por los DHT22 que serán instalados embebidos en el muro (a una profundidad de 10 cm). Se opta por colocar una brida en la perforación existente en la carcasa del sensor a fin de facilitar la extracción del mismo en caso de mal funcionamiento o en la futura retirada del mismo.



Fotografía 61: Instalación sensor DHT22 en el interior del cerramiento (1) (elaboración propia)

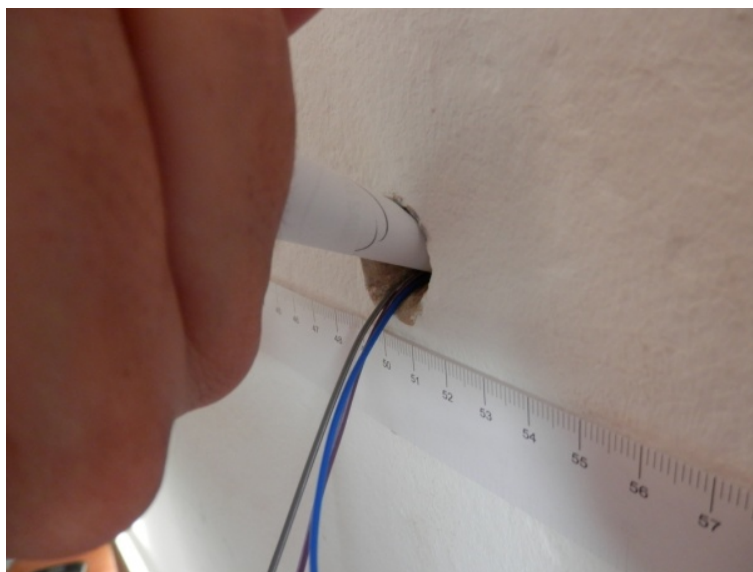


Fotografía 62: Instalación sensor DHT22 en el interior del cerramiento (2) (elaboración propia)

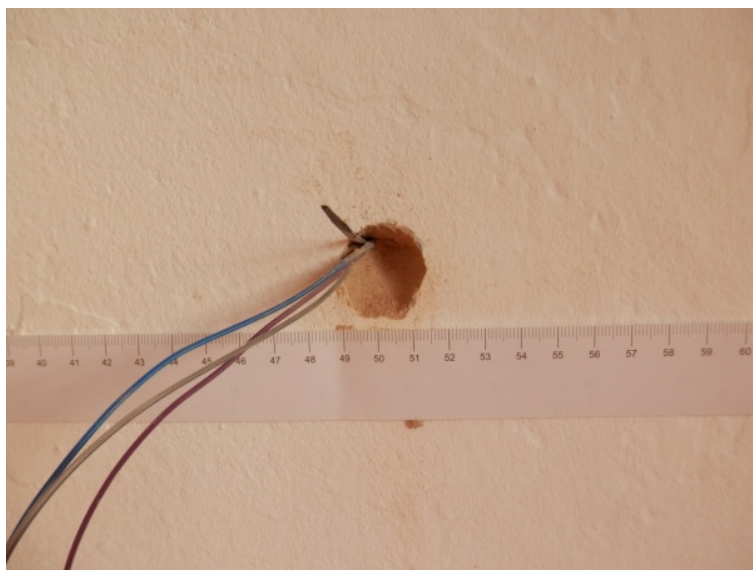


Fotografía 63: Instalación sensor DHT22 en el interior del cerramiento (3) (elaboración propia)





Fotografía 64: Instalación sensor DHT22 en el interior del cerramiento (4) (elaboración propia)



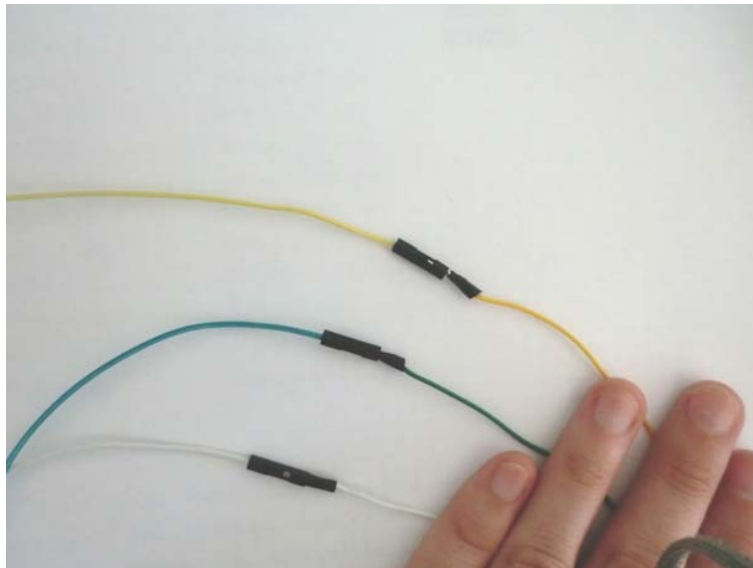
Fotografía 65: Instalación sensor DHT22 en el interior del cerramiento (4) (elaboración propia)

En cuanto al cableado se establece:

	GND
	VCC
	DATA

En las imágenes anteriores se puede apreciar que los cables del sensor instalado en el interior del muro difieren de los anteriormente mencionados como establecidos. Esto se debe a que en la instalación interior de los sensores, a fin de evitar el soldado directo del sensor con el cable se hizo uso de los jumpers macho-macho, los cuales se venden en infinidad de colores, no pudiendo realizar la elección de los mismos.

Una vez instalados los sensores DHT22 en el interior del cerramiento, comienza la instalación de los sensores superficiales, comenzando con los DS18B20. El conexionado del cableado al sensor se realiza igual que en el caso anterior con jumpers, aunque en este caso los colores de los mismos coinciden con el del cable de datos. Para anclarlos a la pared se hace uso de grapas para cable.

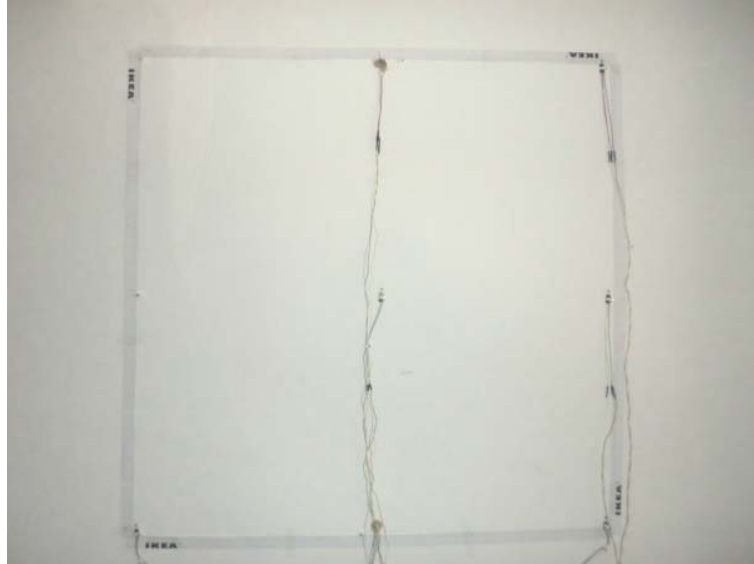


Fotografía 66: Conexión e instalación DS18B20 superficie interior (1) (elaboración propia)



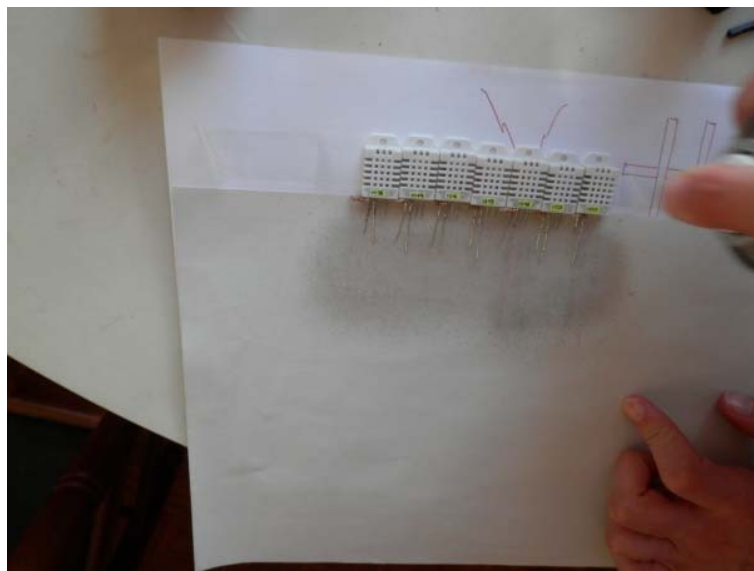
Fotografía 67: Conexión e instalación DS18B20 superficie interior (2) (elaboración propia)

La instalación de los DHT22 resulta más sencilla debido a que poseen una perforación en su carcasa protectora la cual, de la misma forma que permitió la colocación de una brida para los ubicados en el interior del muro, ahora permite utilizar uno de los clavos de las grapas para su instalación definitiva.



Fotografía 68: Proceso instalación interior sensores (elaboración propia)

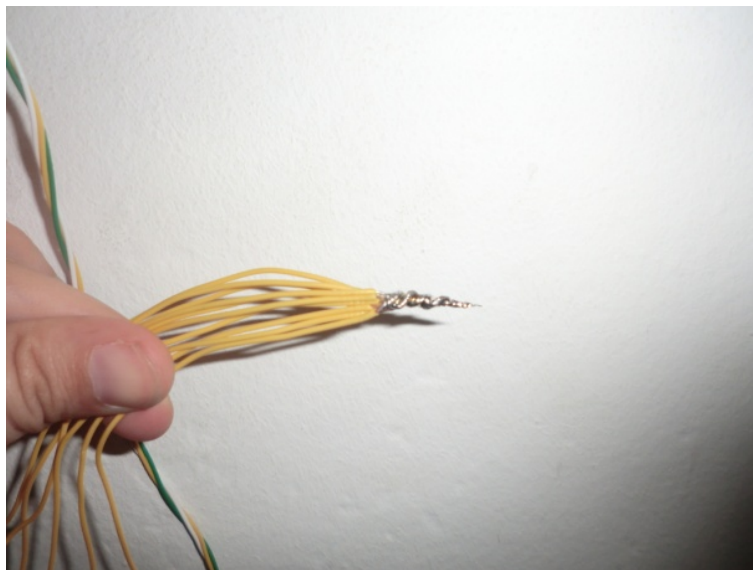
Cabe mencionar, que previa a la instalación de todos los sensores, se procede a la aplicación de laca acrílica protectora y aislante en las patillas de cada uno de ellos para evitar contactos indeseados que puedan arrojar errores en los registros.



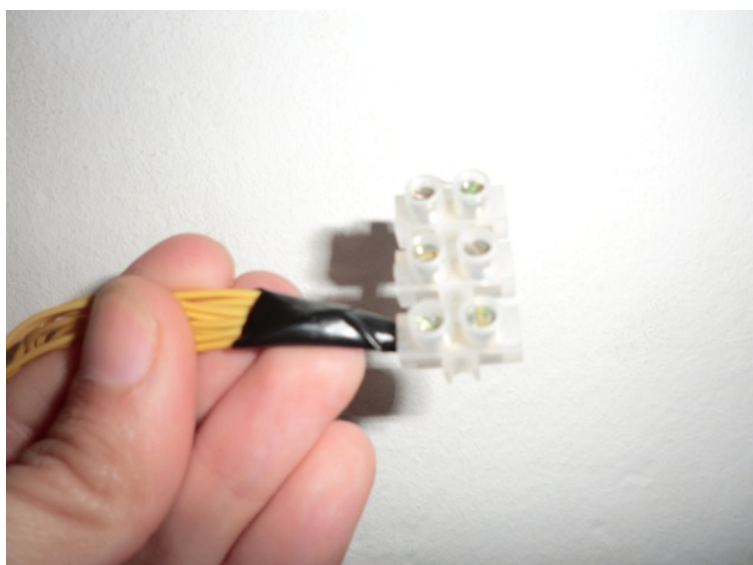
Fotografía 69: Protección de los pines de los sensores con laca acrílica aislante (elaboración propia)

Una vez finalizada la instalación de los sensores en la superficie interior, se procede al conexionado de los mismos. Para ello se opta por confluir el cable de alimentación y conexión a

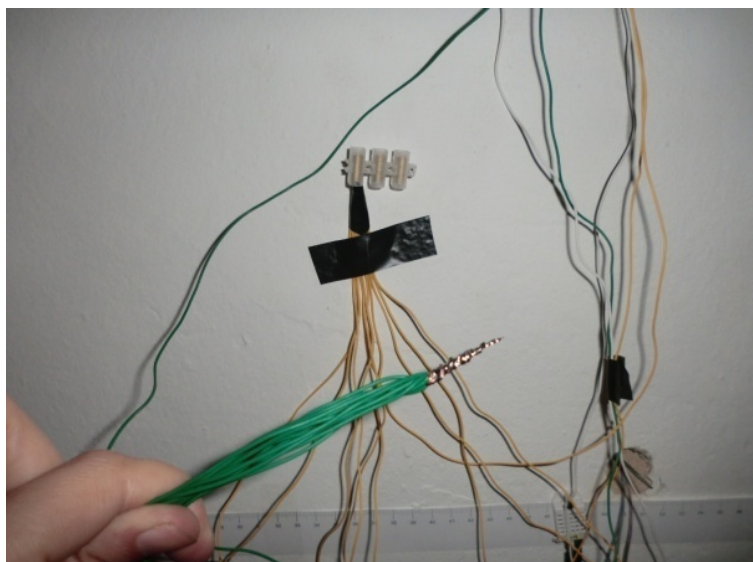
tierra de todos los sensores a una ficha y una vez ahí, dar salida a todos ellos mediante un único cable de alimentación y otro único cable de conexión a tierra que serán los que lleguen a la placa protoboard.



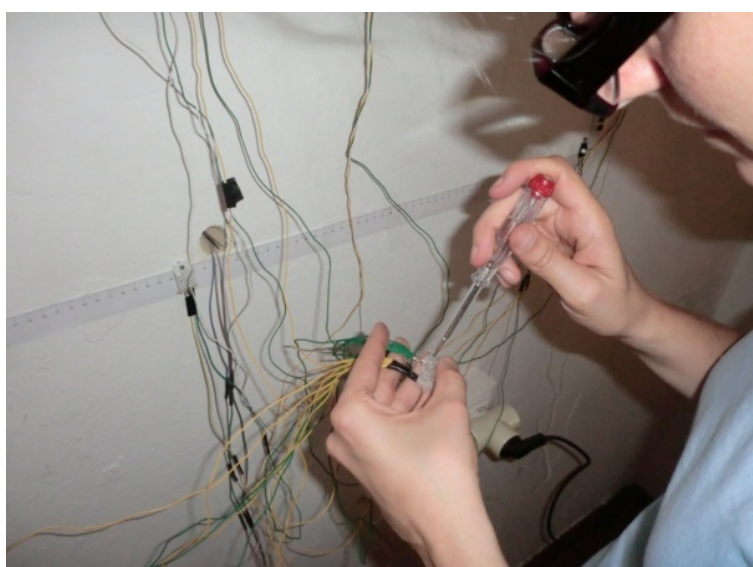
Fotografía 70: Unión cables de alimentación sensores instalación interior (elaboración propia)



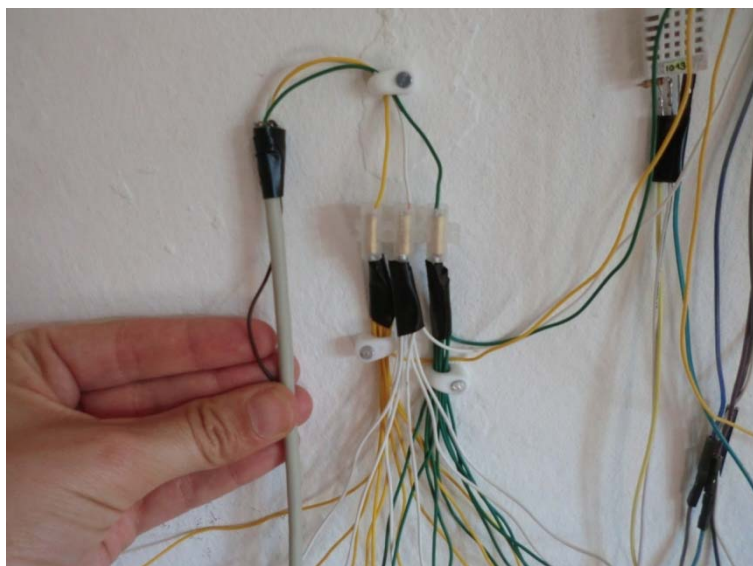
Fotografía 71: Conexión de cables de alimentación sensores instalación interior a ficha (elaboración propia)



Fotografía 72: Unión cables de conexión a tierra sensores instalación interior (elaboración propia)

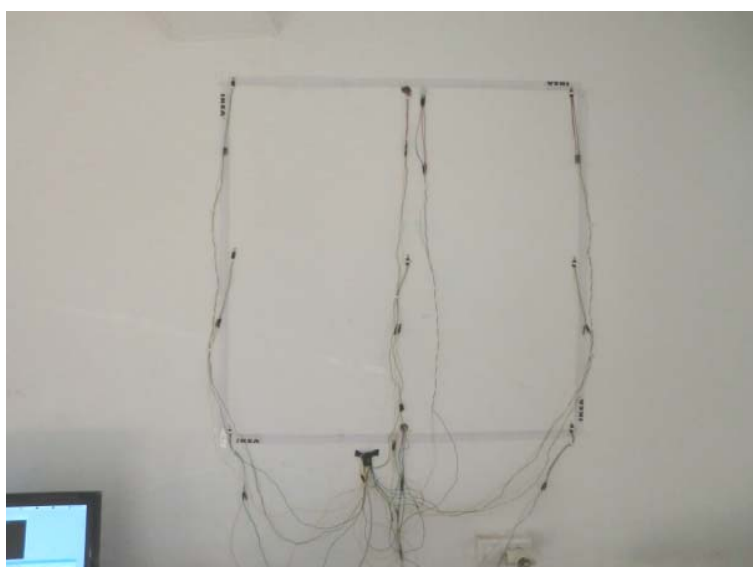


Fotografía 73: Ajuste de ficha en cableado instalación interior (elaboración propia)



Fotografía 74: Conexión de sensores interiores a la placa (elaboración propia)

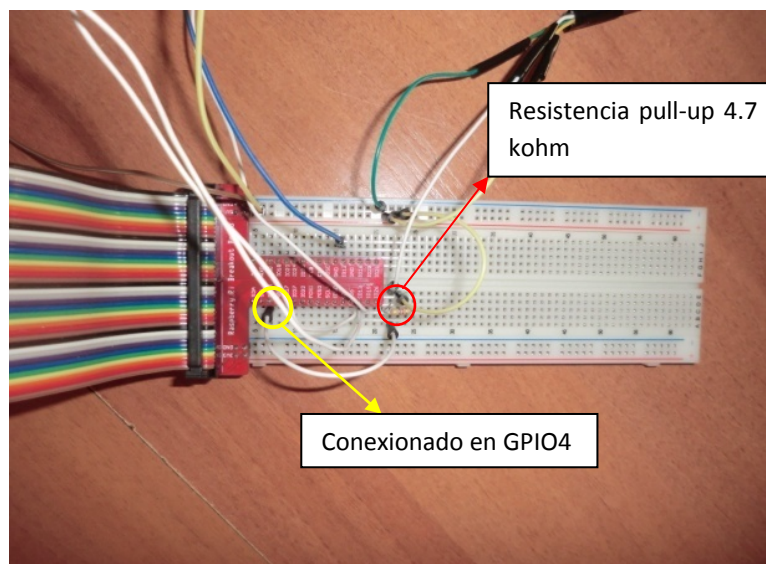
Es importante resaltar que, todos los sensores pueden compartir la conexión de alimentación y toma a tierra, pero en el caso de la conexión de datos los DHT22 deben tener la suya independiente, por lo que no pueden confluir a la ficha eléctrica de la manera que los hacen los DS18B20, aunque para estos sensores no debemos olvidar la colocación de una resistencia pull-up de 4.7 kohm en la placa protoboard, entre los pines de alimentación y datos.



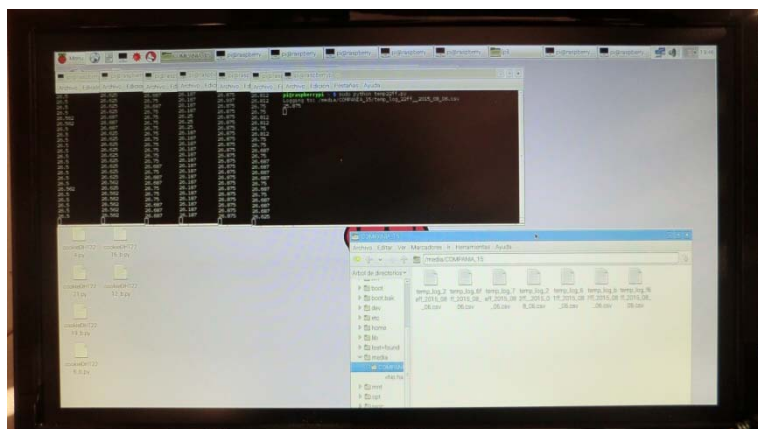
Fotografía 75: Resultado final instalación interior de sensores (elaboración propia)

Una vez conectado, se procede a verificar el funcionamiento de la instalación completa con resultado satisfactorio.

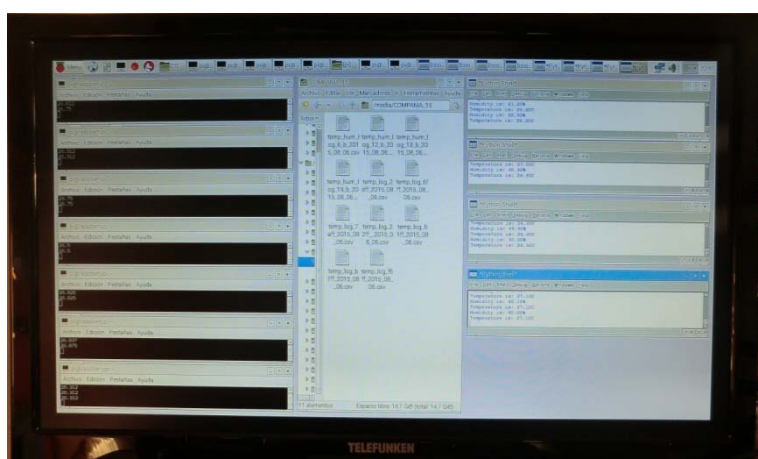




Fotografía 76: Conexionado de instalación interior a placa protoboard (elaboración propia)



Fotografía 77: Puesta en funcionamiento sensores DS18b20 instalación interior (elaboración propia)



Fotografía 78: Puesta en funcionamiento sensores DHT22 instalación interior (elaboración propia)

### 3.1.6. Instalación exterior

Para el montaje de la instalación exterior de los sensores, debido a la particular situación de la misma (sin un acceso sencillo desde la vivienda objeto de estudio ya que se hace necesario acceder al tejado de la vivienda contigua la cual presenta un estado de conservación deficitario) y a la exposición a la que estará sometida la misma se opta por modificar el sistema para efectuar la mayor parte del trabajo en condiciones seguras. Para ello, primeramente verificamos el estado de conservación de la fachada exterior:



Fotografía 79: Fachada exterior objeto de estudio (elaboración propia)

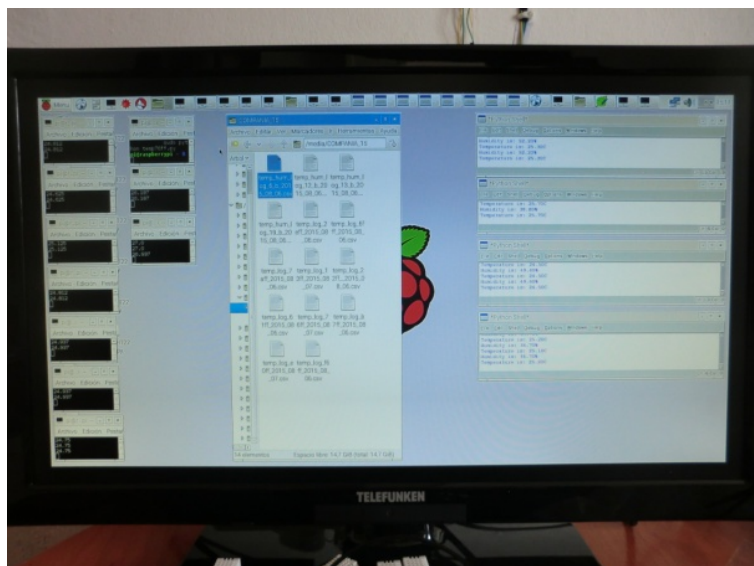
Lo que en una primera inspección parecía un estado aceptable, en el momento de aproximación al elemento constructivo se constatan la existencia de una serie de daños que permiten que incluso habite vida animal en su interior.

Se identifican y etiquetan los sensores DALLAS DS18B20 encapsulados con el mismo protocolo adoptado en la instalación interior y se comprueba el funcionamiento de los mismos:



Fotografía 80: Identificación y etiquetado DS18B20 encapsulado (elaboración propia)



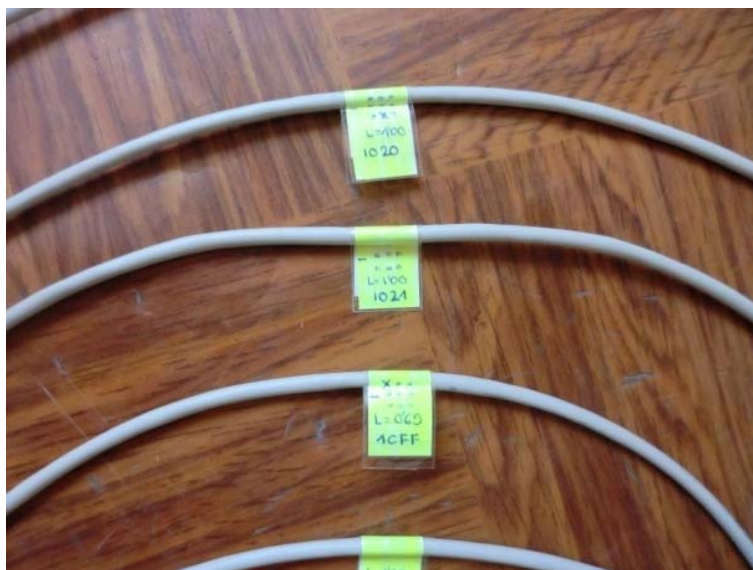


Fotografía 81: Prueba de funcionamiento DS18b20 encapsulado (elaboración propia)

Se preparó e identificó la totalidad del cableado necesario para los sensores de la instalación exterior en el interior de la vivienda según la ubicación final de cada uno de los sensores.

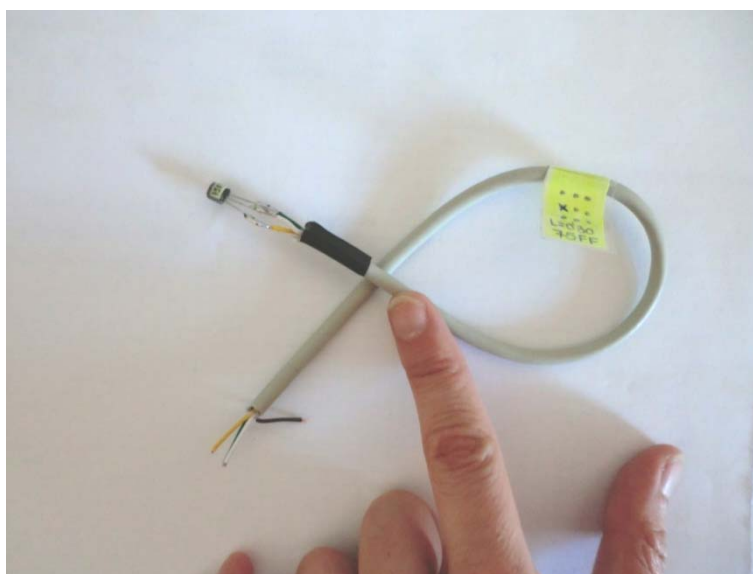


Fotografía 82: Identificación y etiquetado cableado instalación exterior (1) (elaboración propia)



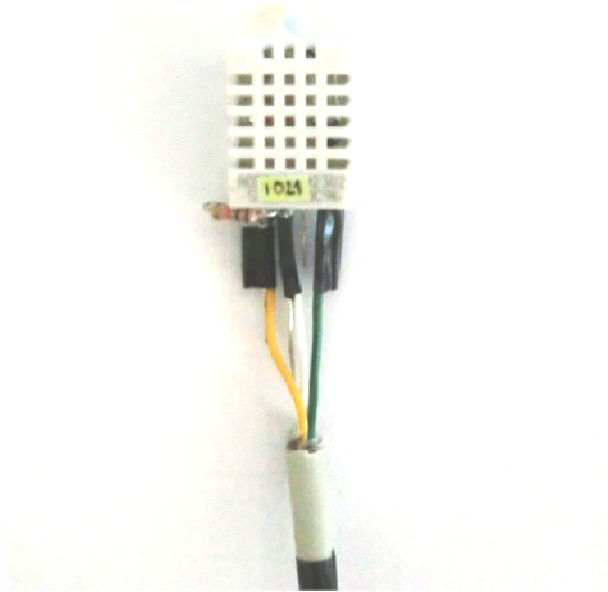
Fotografía 83: Identificación y etiquetado cableado instalación exterior (2) (elaboración propia)

A fin de facilitar los trabajos en el exterior, se opta por añadir en cada cable, además de la identificación del sensor, la posición que ocupará cada uno y la longitud del cable. La idea es crear una disposición en árbol que, al igual que en el caso de la instalación interior confluya en una única conexión mediante ficha que será la que llegue finalmente a la placa protoboard del RPI2.



Fotografía 84: Identificación y etiquetado sensor DS18B20 exterior (elaboración propia)

Otra de las diferencias destacables con respecto a la instalación interior radica en que se adoptó la decisión de prescindir de los jumpers para conectar el sensor, es decir, se procedió a soldar directamente el cable data al sensor.

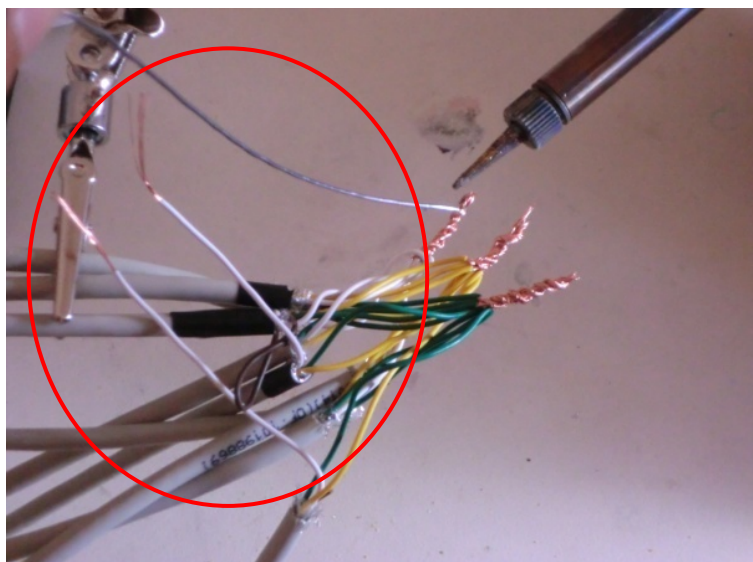


Fotografía 85: Preparación final sensor DHT22 exterior (elaboración propia)

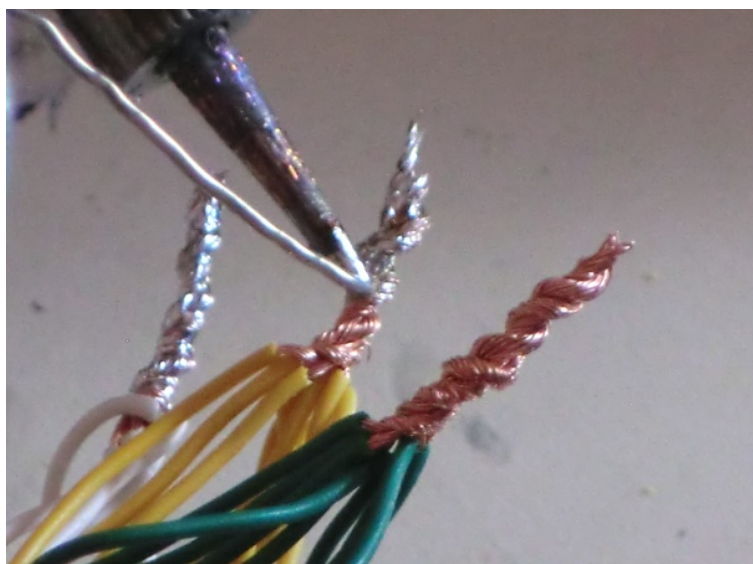
Una vez preparados e identificados todos los sensores, procedemos al conexionado de los mismos a la ficha, reservando los cables de datos pertenecientes a los sensores DHT22 ya que necesitan un GPIO del RPI2 independiente cada uno de ellos:



Fotografía 86: Unificación cableado instalación exterior (elaboración propia)

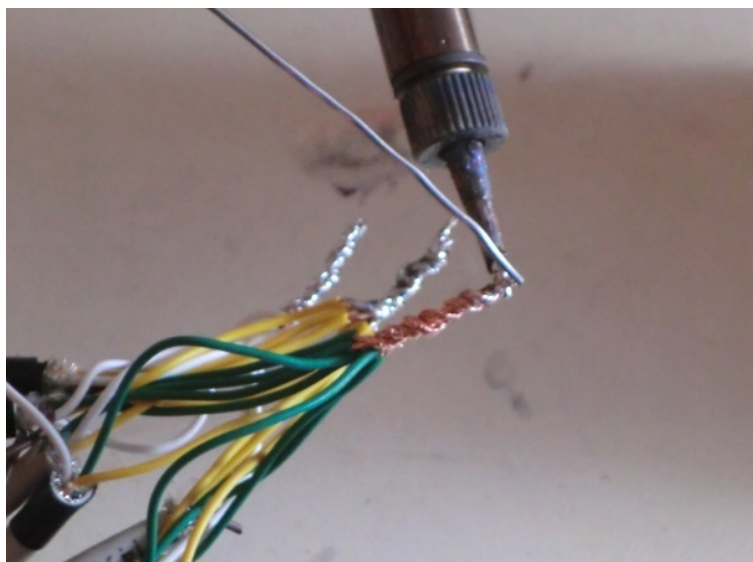


Fotografía 87: Soldado cableado instalación exterior (1) (elaboración propia)



Fotografía 88: Soldado cableado instalación exterior (2) (elaboración propia)





Fotografía 89: Soldado cableado instalación exterior (3) (elaboración propia)

Cabe destacar en este punto que, a pesar de que todos los sensores admiten alimentación a 3.3 V, debido a las longitudes de cable necesarias para la instalación exterior de los mismos y las pérdidas que por ello pudiesen sufrir, se conectará a 5 V.

Una vez finalizada, se realiza una nueva prueba de funcionamiento de toda la instalación:



Fotografía 90: Prueba de funcionamiento sensores DS18B20 de la instalación interior y exterior (elaboración propia)

Una vez comprobado que todos los dispositivos funcionan correctamente, se procede a la instalación en el exterior y la protección de los mismos:



Fotografía 91: Instalación exterior (elaboración propia)

En cuanto a los medios de sujeción empleados en este caso para los sensores, debido a los daños existentes en la parte exterior del cerramiento se hizo necesario recurrir a clavos con una longitud de caña mayor pero que a la vez fuesen válidos para la utilización de las grapas, es decir, que tuviesen el mismo grosor de caña pero mayor longitud.

Para la instalación del sensor ambiente exterior se opta por ubicarlo en la zona del alero de la fachada principal, próxima al área de estudio para evitar así el impacto de la radiación solar directa sobre el mismo.

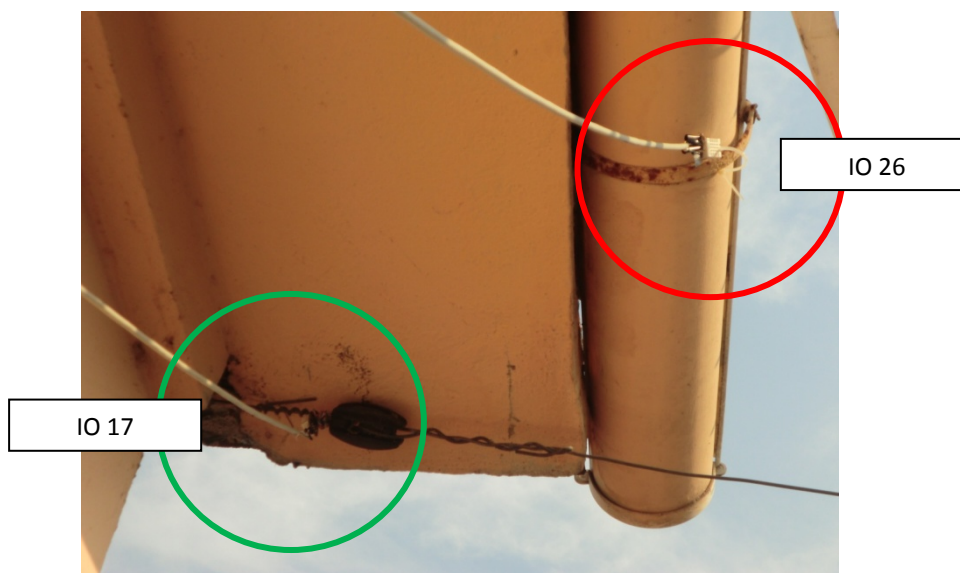
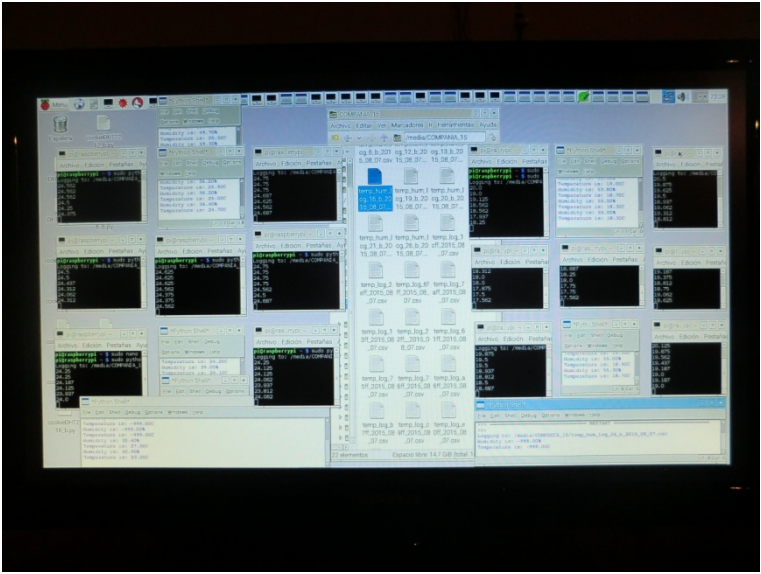


Ilustración 27: Sensor ambiente exterior (elaboración propia)

Primeramente se procedió a la instalación del sensor IO26 pero debido a que, como se puede apreciar en la imagen recibía el impacto de la radiación directa del sol por la tarde, se optó por la instalación de un segundo sensor que estuviese más protegido.

Finalizada la instalación exterior, se realiza la puesta en marcha del conjunto, manteniendo la misma en funcionamiento hasta el viernes 7 de agosto.



Fotografía 92: Prueba final de funcionamiento de toda la instalación de sensores (elaboración propia)

**3.3. FRECUENCIA DE LECTURA Y REGISTRO.**

El ensayo comenzó el 7 de agosto, y concluyó al mediodía el 14 del mismo mes, disponiendo por tanto de siete días completos, tomando registros de cada uno de los valores cada 10 minutos. Durante este período no existieron cargas por calefacción y ocupación ya que la vivienda se encuentra actualmente deshabitada. Aunque hubo alguna fuga de aire a través de las puerta y/o ventanas, estas se mantuvieron cerradas durante el test para minimizar el intercambio de aire.

A pesar de que para el presente trabajo únicamente se toman los datos relativos a la semana del 7 al 14 de agosto, la monitorización de dicho elemento continúa a día de hoy registrando datos ya que el presente estudio pretende registrar y analizar el comportamiento de este elemento constructivo durante un año completo.

		CS1
Verano	Comienzo	7 agosto 22:20
	Fin	14 agosto 22:20
	Duración	7 días

Se monitorizó, temperatura y humedad ambiente interior y exterior, temperatura interior y exterior en la superficie de los muros y temperatura y humedad interior del muro. El

comportamiento de los muros fue examinado analizando la evolución de las temperaturas interiores y exteriores

### 3.4. HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS DE DATOS.

#### 3.1.7. Análisis de los datos obtenidos.

Una vez obtenidos los datos de la monitorización, se procede a la depuración de los mismos, eliminando lecturas erróneas.

1				
2	20:36:22,-999.00,-999.00			
3	20:36:28,-999.00,-999.00			
4	20:36:35,25.50,49.70			
5	20:36:51,-999.00,-999.00			
6	20:46:51,-999.00,-999.00			
7	22:27:01,25.50,50.00			
8	22:37:02,25.50,48.40			
9	22:47:02,25.50,49.70			
10	22:57:02,25.50,49.30			

Fotografía 93: Registro datos sensor DHT22 (elaboración propia)

1	07/08/2015	22:27:01	25,500	50,000	
2	07/08/2015	22:37:02	25,500	48,400	
3	07/08/2015	22:47:02	25,500	49,700	
4	07/08/2015	22:57:02	25,500	49,300	
5	07/08/2015	23:07:01	25,500	49,800	
6	07/08/2015	23:17:02	25,500	48,700	
7	07/08/2015	23:27:02	25,500	48,600	
8	07/08/2015	23:37:02	25,500	49,900	
9	07/08/2015	23:47:02	25,500	48,300	
10	07/08/2015	23:57:02	25,500	48,300	

Fotografía 94: Filtrado datos sensor DHT22 ( elaboración propia )

Este filtrado de los registros resultado de la monitorización y su posterior análisis nos deben proporcionar datos no sólo de la evolución del sistema durante el periodo de monitorización, sino que también poder extrapolar conclusiones sobre el comportamiento y la caracterización energética del elemento.

#### 3.1.8. Modelado de los datos obtenidos. Gráficos.

Para la obtención de gráficos una vez depurados y filtrados los registros se utilizará Excel.



### 3.5. PRUEBAS, PROBLEMAS Y SOLUCIONES

Durante el proceso experimental surgieron una serie de problemas a los que hubo que ir buscando solución.

Para la realización del proyecto ha sido necesaria la realización de múltiples pruebas ya que la integración de tantos dispositivos, 22 en total, aumenta la probabilidad de fallo.

Durante la instalación de cada sensor, los pasos a seguir fueron::

1. Montaje del dispositivo y conexión del mismo al RPI2.
2. Escritura y carga de un script exclusivo para ese elemento.
3. Pruebas de funcionamiento por separado y verificación del mismo.
4. Si el resultado de la prueba es satisfactorio, se procede a conectarlo junto con el
5. resto de los dispositivos.
6. Verificación de que no altera y/o no existe incompatibilidad con los demás dispositivos.
7. Se carga de nuevo el script y se pone en funcionamiento el dispositivo.
8. Verificación de funcionamiento del conjunto.
9. Se deja funcionando cierto tiempo para ver si aparecen fallos.

En la mayoría de los casos, tras un periodo de análisis, se ha conseguido encontrar y solucionar el fallo, aunque en otras ocasiones ha sido necesario recurrir a foros de internet.

Alguno de los problemas surgidos han sido:

1. Durante la fase de programación han surgido infinidad de comportamientos o respuestas inesperadas del sistema debido a la inexperiencia de la autora en dichas tecnologías. Se resolvieron mediante continuas revisiones de la programación y depurando el código hasta dar con el apropiado.
2. El proceso de la instalación de la red de sensores exteriores, además del pre-diseño de la misma para efectuar la mayor parte del trabajo en condiciones seguras, hizo necesario el uso de medios auxiliares de protección individual para el posicionamiento final debido al mal estado de conservación de la cubierta de la edificación contigua.
3. Problemas con funcionamiento de los scripts.
4. Errores durante conexión del cableado, solucionados tras el análisis de los mismos.



## CAPÍTULO 4: CASO DE ESTUDIO

### 4.1. DESCRIPCIÓN DE LA EDIFICACIÓN.

El presente estudio experimental se desarrolla en una vivienda unifamiliar ubicada en casco urbano y situada entre medianeras y alineada. El año de la construcción principal es 1880, aunque en torno a los años 60 sufre una intervención en la fachada principal recubriéndola con una estructura de ladrillo.



Fotografía 95: Localización caso estudio ([www.google.es/maps](http://www.google.es/maps))

La planta es rectangular, con una superficies útiles como siguen:

	Uso	Superficie construida (m2)
Planta baja	Comercial	43
	Vivienda	16
Planta primera	Vivienda	63
Planta segunda	Vivienda	63

Tabla 32: Cuadro superficies y usos CS (elaboración propia)

La cubierta es de teja tipo país a dos aguas, con estructura de madera. La fachada principal tiene una longitud de 6.10 m. mientras que la fachada trasera mide 7.35 m. Las fachadas laterales, ambas se aproximan a los 9.00 m.



Fotografía 96: Fachada principal vivienda objeto estudio (elaboración propia)



Fotografía 97: Fachada trasera vivienda objeto estudio (elaboración propia)

Las dependencias se organizan hacia ambas fachadas, y de manera análoga para cada una de las plantas.

Los cerramientos de la vivienda son de tapia, con un espesor de 70 cm en todo el perímetro. La fachada principal sufrió una intervención en torno a los años 60 en la cual se recubre con una estructura de ladrillo, pero manteniendo la tapia hacia el interior, resultando así un espesor total del cerramiento de 80 cm.

En cuanto a los huecos, la vivienda se abre hacia la fachada principal, orientada al oeste, con una ventana y una puerta de acceso hacia un balcón exterior, mientras que en la parte trasera el tamaño de los huecos se ve reducido y no son practicables en su totalidad, a excepción de una parte de los mismos destinada a ventilación de las estancias traseras.. Las carpinterías son de madera, colocadas a haces exteriores, con vidrio simple y persiana al exterior

La estructura portante horizontal se resuelve mediante entramado de madera y la cubierta mediante tablero y vigas de madera recubierta con teja curva tipo país.

#### 4.2. DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE.



Ilustración 28: Cerramiento monitorizado SV (elaboración propia)

El componente objeto de la monitorización se trata de un muro de tapia de 70 cm de espesor, con protección exterior a base de calicostra, situado en la fachada lateral izquierda de la segunda planta de la vivienda y cuya orientación es sur.

#### 4.3. DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO Y CALENDARIO.

La vivienda, de más de cien años de antigüedad, presenta daños en algunos de sus componentes, debido a una conservación pobre, por lo que la hermeticidad no puede ser asegurada.

Su fachada principal está orientada hacia el oeste, por lo que la fachada monitorizada fue la de orientación sur. Esta fachada no presenta elementos próximos que puedan ocasionar sombreamiento en algún momento del día. Sin embargo, el sensor para la medición de las temperaturas ambientales exteriores se instaló bajo el alero de la fachada principal, para que la radiación solar no alterase los registros.

Se evitó la instalación de los elementos de medición en áreas de puente térmico, para ello se instalaron los sensores a una distancia de la fachada principal igual al espesor del cerramiento.

Se colocaron las siguientes sondas en cada fachada, programadas para registrar datos en intervalos de diez minutos:

- Temperatura y humedad exterior (ambiente)
- Temperatura y humedad interior (ambiente)
- Temperatura superficial exterior (h: 120, 170 y 220 cm)
- Temperatura superficial interior (h: 120, 170 y 220 cm)
- Temperatura y humedad interior muro a una profundidad de 10 cm (h: 120 y 220 cm)
- Temperatura y humedad superficial interior (h: 120 y 220 cm)
- Temperatura y humedad superficial exterior (h: 120 y 220 cm)

El ensayo comenzó el 7 de agosto, y concluyó al mediodía el 14 del mismo mes, disponiendo por tanto de siete días completos. Durante este período no existieron cargas por calefacción y ocupación ya que la vivienda se encuentra actualmente deshabitada, aunque la hermeticidad no pudo ser asegurada debido al estado de conservación de puertas y ventanas.

Verano	Comienzo	7 agosto 22:20
	Fin	14 agosto 22:20
	Duración	7 días

Tabla 33: Calendario (elaboración propia)

#### 4.4. ESQUEMAS DE INSTALACIÓN DE LOS SENSORES:

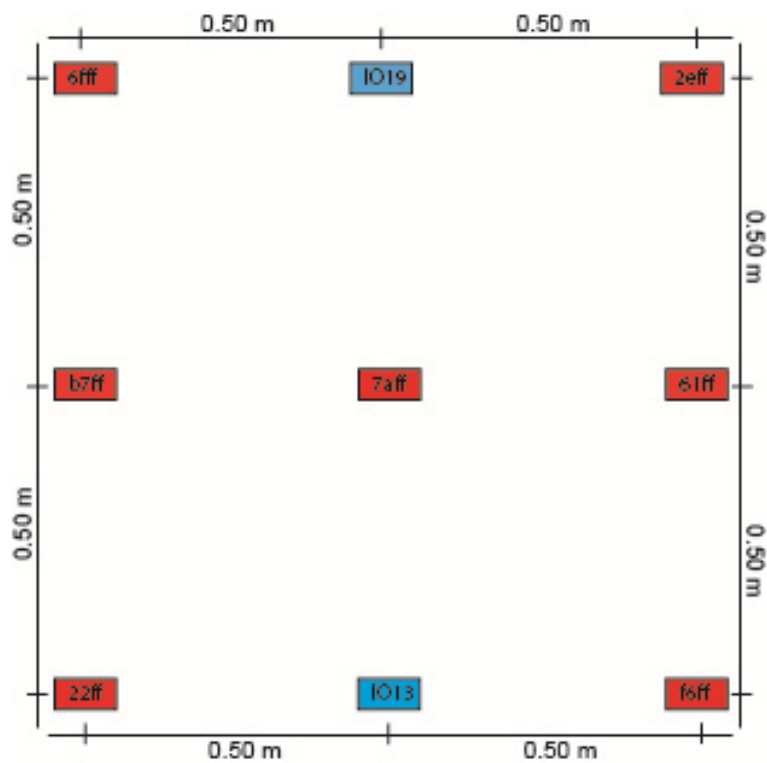


Ilustración 29: Esquema instalación sensores exterior (elaboración propia)

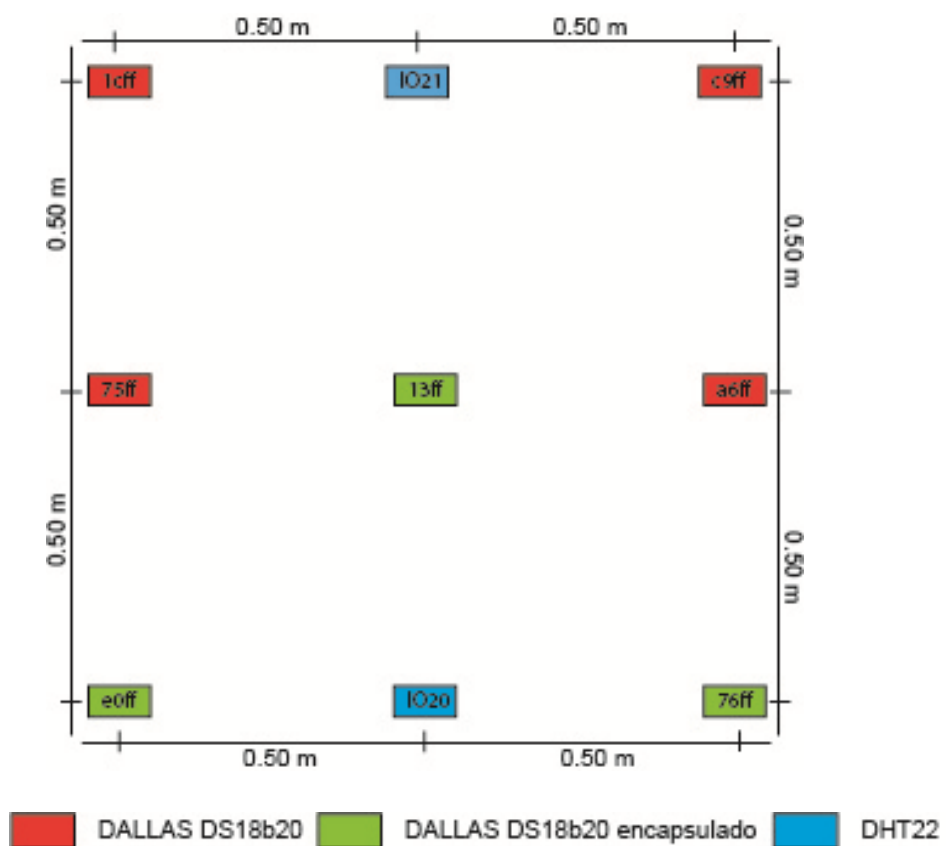


Ilustración 30: Esquema instalación sensores exterior (elaboración propia)

Sensores interiores al muro:

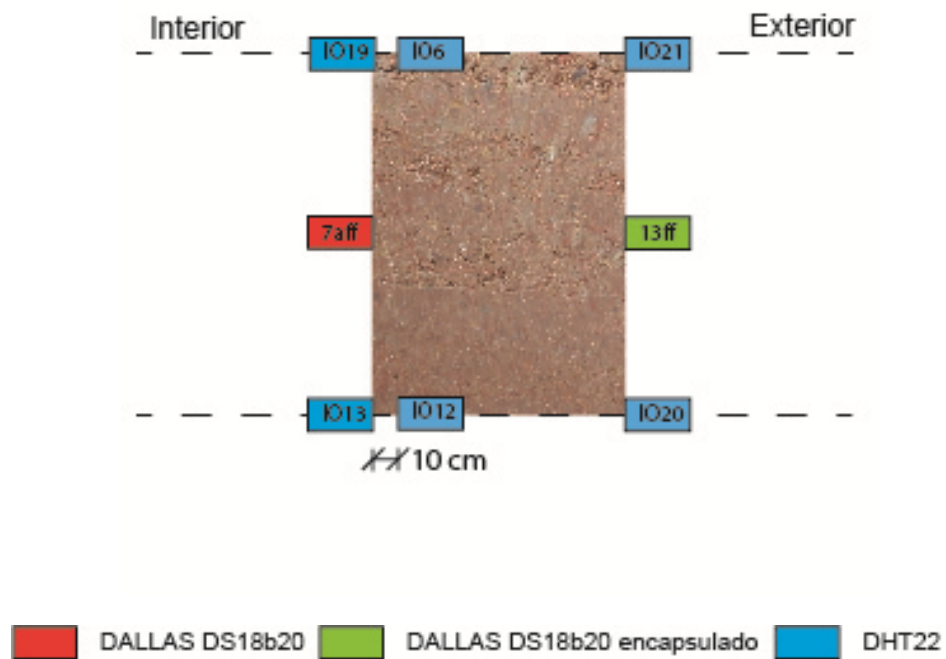


Ilustración 31: Esquema instalación sensores interior muro (elaboración propia)

#### 4.5. DATOS CLIMÁTICOS DISPONIBLES

La Estación Marroxo está ubicada a 42,47° de latitud e -7,5° de longitud e y a una altitud de 645 metros. Fecha alta: 1 de Enero de 2001.

Sensores de la Estación: Anemómetro, cataviento, piranómetro, pluviómetro, sonda de presión, sonda de temperatura de superficie, sonda de temperatura y humedad.





Fotografía 98: Estación Marroxo ([www.meteogalicia.es](http://www.meteogalicia.es))

#### 4.6. VARIABLES DE MEDIDA.

Se monitorizó, temperatura y humedad ambiente interior y exterior, temperatura interior y exterior en la superficie de los muros y temperatura y humedad interior del muro. Las temperaturas son registradas en grados centígrados mientras que los valores de humedad en tanto por ciento.

El formato de recopilación de los datos fue .csv (comma separated values). Se trata de un formato sencillo en el cual las columnas se recogen separadas por comas y las filas por saltos de línea. Se opta por este formato debido a que es aceptado por la mayoría de softwares de análisis de datos.

## CAPÍTULO 5: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

Los muros de tierra tradicionalmente no han requerido ningún tipo de aislamiento añadido ya que aunque su factor U de transmitancia térmica no es comparable al de otros materiales convencionales, su masa térmica permite acumular una gran cantidad de calor.

Aun así, la actual normativa nos obliga a cumplir unos valores máximos de transmitancia térmica U en W/m<sup>2</sup> K, establecido según CTE en función de la ubicación geográfica de nuestro edificio. Veamos que sucede en para nuestro caso de estudio:

### 5.1. CUMPLIMIENTO DEL CTE

Los valores de conductividad  $\lambda$  ( W/ m K) para la tierra como material de construcción son difíciles de encontrar. Si recurrimos al Catálogo de materiales y elementos constructivos del CTE se puede observar que establece un intervalo de densidad para todos los materiales ejecutados con tierra, pero sin embargo establece un único valor de conductividad común para todos.

#### 3.1.2 Materiales artificiales o suelos tratados

Materiales artificiales o suelos tratados				
Material	HE			
	$\rho$ kg / m <sup>3</sup>	$\lambda$ W / m·K	$c_p$ J / kg·K	$\mu$
Arcilla cocida para piezas de albañilería <sup>(1)</sup>	2300 < $\rho$ ≤ 2400	0,90	1000	10
	2200 < $\rho$ ≤ 2300	0,85	1000	10
	2100 < $\rho$ ≤ 2200	0,79	1000	10
	2000 < $\rho$ ≤ 2100	0,74	1000	10
	1900 < $\rho$ ≤ 2000	0,69	1000	10
	1800 < $\rho$ ≤ 1900	0,64	1000	10
	1700 < $\rho$ ≤ 1800	0,59	1000	10
	1600 < $\rho$ ≤ 1700	0,55	1000	10
	1500 < $\rho$ ≤ 1600	0,50	1000	10
	1400 < $\rho$ ≤ 1500	0,46	1000	10
	1300 < $\rho$ ≤ 1400	0,43	1000	10
	1200 < $\rho$ ≤ 1300	0,39	1000	10
	1100 < $\rho$ ≤ 1200	0,35	1000	10
	1000 < $\rho$ ≤ 1100	0,32	1000	10
	$\rho$ ≤ 1000	0,29	1000	10
Piedra artificial	$\rho$ ≤ 1750	1,30	1000	40
Tierra apisonada, adobe, bloques de tierra comprimida	1770 ≤ $\rho$ ≤ 2000	1,10	-	-

Tabla 34: Catálogo de elementos constructivos del CTE. Materiales artificiales o suelos tratados.

Minke adopta los valores de conductividad establecidos por Volhard los cuales dependen únicamente de la densidad, sin embargo Arnold establece una relación entre el contenido de humedad y la conductividad para materiales de mampostería que concuerda razonablemente bien con estos valores para un contenido de humedad de 5%.

	Conductividad $\lambda$ ( W/ m K)	
Densidad ( kg/m <sup>3</sup> )	DIN 4108 - 4	Arnold (5% contenido humedad)
1400	0.6	0.56
1600	0.8	0.73
1800	0.95	0.94
2000	1.2	1.21

Tabla 35: Relación entre conductividad y densidad (Heathcote, 2011)

Como se puede apreciar en los valores de la tabla adjunta, son bastante similares.

Ecuación 4: Ecuación de Arnold: Conductividad  $\lambda = 0.0011 * \text{Densidad} - 1$  ( W/ m K)

A partir de esta ecuación, se obtienen los valores de conductividad mostrados en la siguiente tabla para los diferentes tipos de construcción con tierra:

Material	Densidad ( kg/m <sup>3</sup> )	Conductividad $\lambda$ ( W/ m K)
Cob	1450	0.6
Adobe	1650	0.82
BTC manual	1750	0.93
Tierra apisonada o BTC prensado mecánicamente	2000	1.20

Con estos datos en mente, para el cálculo de la resistencia térmica de nuestro elemento constructivo se opta por adoptar el valor de  $\lambda = 1.20$  W/ m K.

	e (m)	Conductividad $\lambda$ ( W/ m K)	R
Resistencia térmica superficial exterior $R_{se}$			0.040
Tierra apisonada	0.7	1.20	0.583
Resistencia térmica superficial interior $R_{si}$			0.130

		RT ( m <sup>2</sup> °C / W)	0.753
		U = 1 / RT (W / m <sup>2</sup> °C)	1.327

Tabla 36: Cálculo transmitancia cerramiento tapia e=70 cm (elaboración propia)

De los cálculos anteriores se obtiene como resultado que para un cerramiento de tierra apisonada de 70 cm de espesor, el valor de la transmitancia térmica es de  $U = 1 / RT = 1.327$  (W / m<sup>2</sup> °C)

Código Técnico de la Edificación y su Documento Básico de Ahorro de Energía:

Para el cálculo de la limitación de la demanda energética el CTE establece 12 zonas climáticas identificadas mediante una letra y un número según la tabla D.1 el apéndice D del DH HE1.

Granada	C3	754	h < 50	h < 350	h < 600	h < 800	h < 1300	h < 1300
Guadalajara	D3	708					h < 950	h < 1000
Huelva	A4	50	h < 50	h < 150	h < 350	h < 800	h < 800	h < 1000
Huesca	D2	432				h < 200	h < 400	h < 700
Jalón	C4	436		h < 350	h < 750		h < 1250	h < 1250
León	E1	346					h < 1250	h < 1250
Lérida/Lleida	D3	131			h < 100		h < 600	h < 600
Lugo	D1	412			h < 500	h < 1000	h < 1000	h < 1000
Madrid	D3	589			h < 500	h < 950	h < 1000	h < 1000
Málaga	A3	0		h < 300		h < 700	h < 700	h < 1000
Melilla	A3	130						h < 1000
Murcia	B3	25		h < 100		h < 550	h < 550	h < 800
Ormaiztegui	D2	327			h < 150	h < 300	h < 800	h < 800
Oviedo	D1	214				h < 50	h < 550	h < 550
Palencia	D1	722					h < 800	h < 800
Palma de Mallorca	B3	1		h < 250	h < 250		h < 300	h < 600
Pamplona/Iruña	D1	456				h < 100	h < 300	h < 600
Pontevedra	C1	77				h < 350	h < 350	h < 800
Salamanca	D2	770					h < 800	h < 800

Tabla 37: Zonas climáticas (Código Técnico de la Edificación)

Nuestro caso de estudio se ubica en Monforte de Lemos, provincia de Lugo y además se encuentra a una h < 500 m, por lo que se sitúa en zona D1.

Los parámetros característicos que definen la envolvente térmica del edificio deben cumplir con los valores máximos establecidos en la tabla D.2. del DB HE1 del CTE, en función de la zona climática en la que se ubique el edificio.

### D.2.13 ZONA CLIMÁTICA D1

Transmitancia límite de muros de fachada y cerramientos en contacto con el terreno	<b><math>U_{Mlim}: 0,66 \text{ W/m}^2 \text{ K}</math></b>
Transmitancia límite de suelos	<b><math>U_{Slim}: 0,49 \text{ W/m}^2 \text{ K}</math></b>
Transmitancia límite de cubiertas	<b><math>U_{Clim}: 0,38 \text{ W/m}^2 \text{ K}</math></b>
Factor solar modificado límite de lucernarios	<b><math>F_{Llim}: 0,36</math></b>

% de huecos	Transmitancia límite de huecos $U_{Hlim} \text{ W/m}^2 \text{ K}$				Factor solar modificado límite de huecos $F_{Hlim}$					
					Baja carga interna			Alta carga interna		
	N/NE/NO	E/O	S	SE/SO	E/O	S	SE/SO	E/O	S	SE/SO
de 0 a 10	3,5	3,5	3,5	3,5	-	-	-	-	-	-
de 11 a 20	3,0	3,5	3,5	3,5	-	-	-	-	-	-
de 21 a 30	2,5	2,9	3,5	3,5	-	-	-	-	-	-
de 31 a 40	2,2	2,6	3,4	3,4	-	-	-	0,54	-	0,58
de 41 a 50	2,1	2,5	3,2	3,2	-	-	-	0,45	-	0,49
de 51 a 60	1,9	2,3	3,0	3,0	-	-	-	0,40	0,57	0,44

Tabla 38: Transmitancia térmica máxima de cerramientos y particiones interiores de la envolvente térmica para la zona climática D1 (CTE DB HE 1)

En nuestro caso, el valor máximo establecido por el CTE para la zona climática D1 es de  $0,66 \text{ W / m}^2 \text{ K}$ , por lo que a día de hoy no sería posible ejecutar nuestro cerramiento dando cumplimiento a la normativa actual de construcción.

$$U = 1,327 \text{ W / m}^2 \text{ K} > U = 0,66 \text{ W / m}^2 \text{ K} \text{ establecido por el CTE}$$

	e (m)	Conductividad $\lambda$ ( W/ m K)	R
Resistencia térmica superficial exterior $R_{se}$			0.040
Tierra apisonada	1.15	1.20	1.38
Resistencia térmica superficial interior $R_{si}$			0.130
		RT ( $\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C} / \text{W}$ )	1.55
		$U = 1 / \text{RT} (\text{W} / \text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C})$	0.64516129

Para dar cumplimiento a los valores de transmitancia establecidos por el CTE, sería necesaria la construcción del un muro de tapia de 1.15 m de espesor.

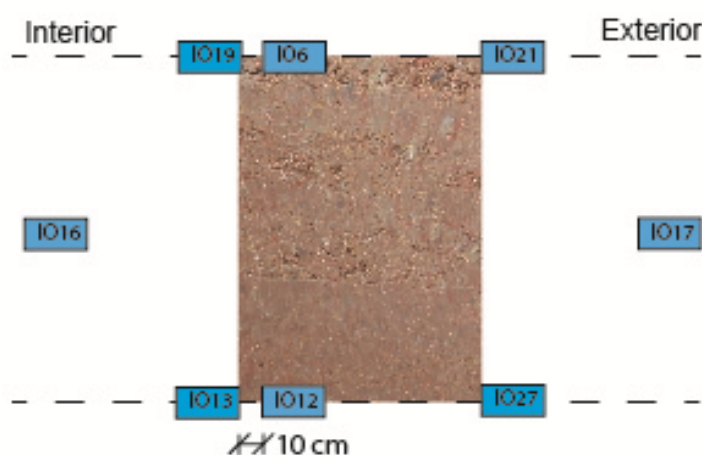
## 5.2. REGISTRO DE LOS SENSORES

Para la realización del presente análisis, se han seleccionado los datos registrados correspondientes a día más caluroso y al día más frío dentro del periodo de monitorización, correspondiéndose con el 11 y 13 de agosto respectivamente.

### 5.2.1. Lecturas 11 de agosto de 2015

Debido al número de sensores instalados tanto en la cara interior como en la exterior del cerramiento y la problemática surgida con alguno de ellos durante la monitorización, se deciden tomar como representativos:

- IO16: sensor ambiente interior.
- IO19: sensor superficial interior (h = 2.20 m)
- IO6: sensor interior muro (h = 2.20 m)
- IO21: sensor superficial exterior (h = 2.20 m)
- IO13: sensor superficial interior (h = 1.20 m)
- IO12: sensor interior muro (h = 1.20 m)
- IO27: sensor superficial exterior (h = 1.20 m)
- IO17: sensor ambiente exterior



Una vez obtenidas las gráficas relativas a cada uno de ellos, se constata que para los sensores ubicados en la cara exterior del cerramiento, se registran las oscilaciones propias de los valores de temperatura y humedad relativa asociada a un día soleado. Así, a las horas centrales del día los valores de humedad caen bruscamente a la vez que ascienden las temperaturas.

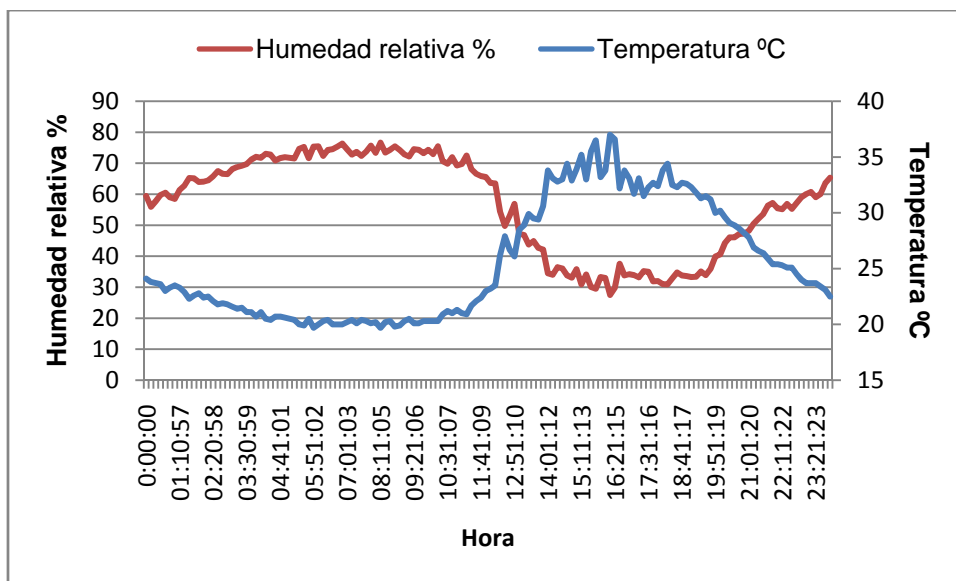


Gráfico 24: Temperatura y humedad relativa IO21 (11/8/2015) (elaboración propia)

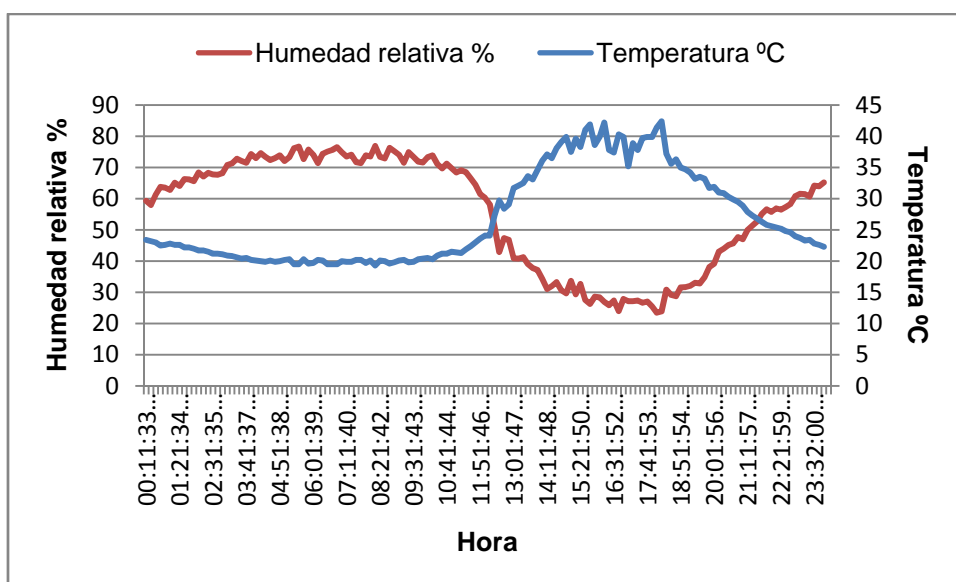


Gráfico 25: Temperatura y humedad relativa IO27 (11/8/2015) (elaboración propia)

Los valores máximos de las temperaturas se producen alrededor de las 16:00 para los sensores IO21 e IO27 (ubicados en la superficie del muro) debido a que la fachada objeto de estudio presenta una orientación completamente sur.

Sin embargo, para el sensor IO17 (ambiente exterior) estos valores máximos se registran en torno a las 18:00 debido a que dicho sensor se ubica bajo el alero frontal de la vivienda (orientación oeste) debido a la necesidad de protegerlo de la radiación solar directa y las inclemencias meteorológicas.

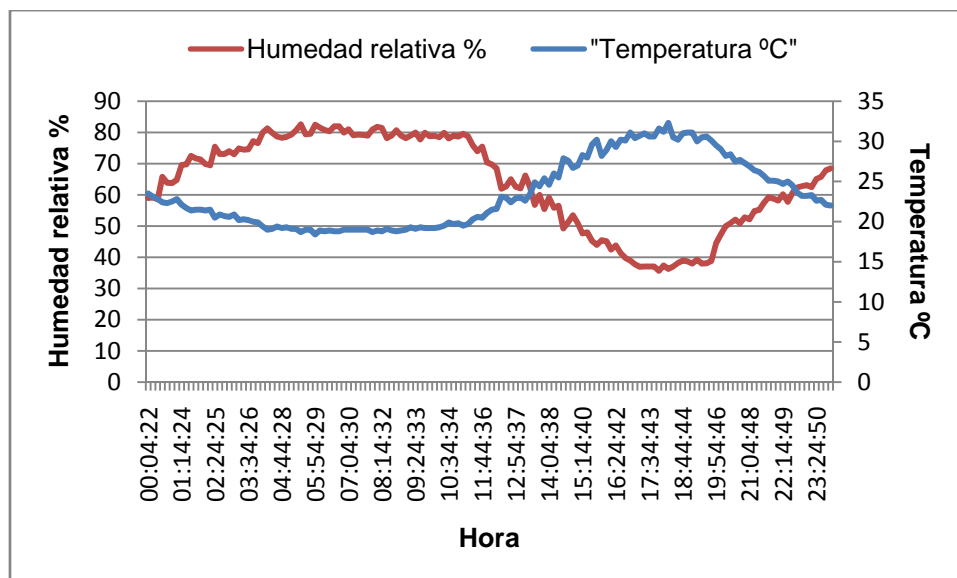


Gráfico 26: Temperatura y humedad relativa IO17 (11/8/2015) (elaboración propia )

Para los sensores ubicados en el interior de la estancia, si los estudiamos de una forma individualizada, los registros muestran una estabilidad prácticamente continua tanto para los valores de temperatura como para los de humedad relativa a lo largo de toda la jornada y sin grandes oscilaciones a lo largo de toda la jornada.

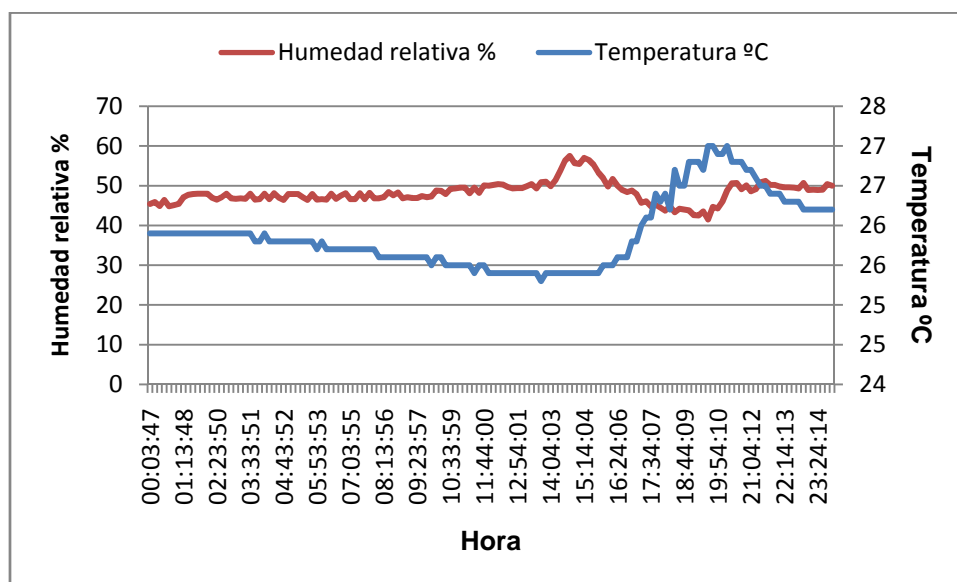


Gráfico 27: Temperatura y humedad relativa sensor IO19 (superficie interior h=2.20 m) (elaboración propia)



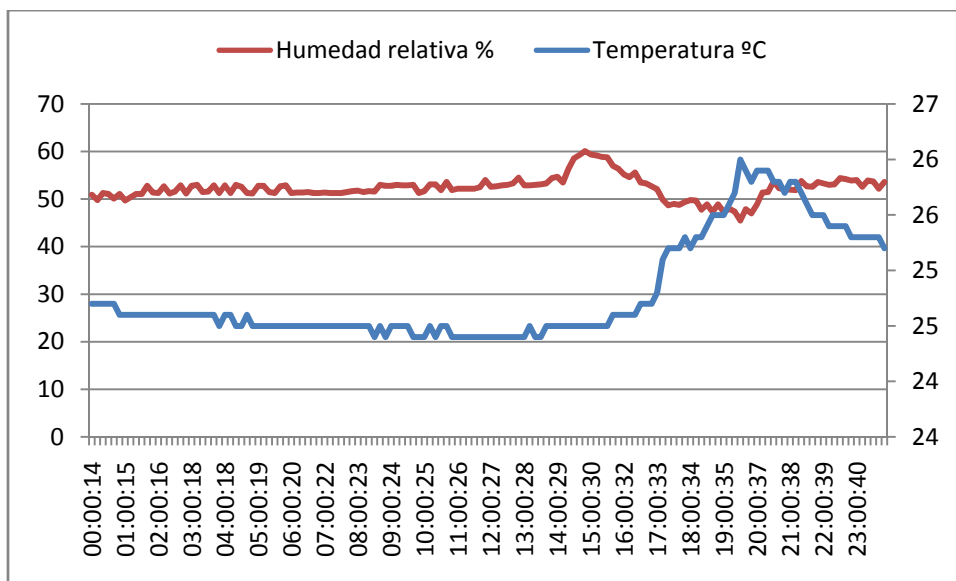


Gráfico 28: Temperatura y humedad relativa sensor IO13 (superficie interior h=1.20 m) (elaboración propia)

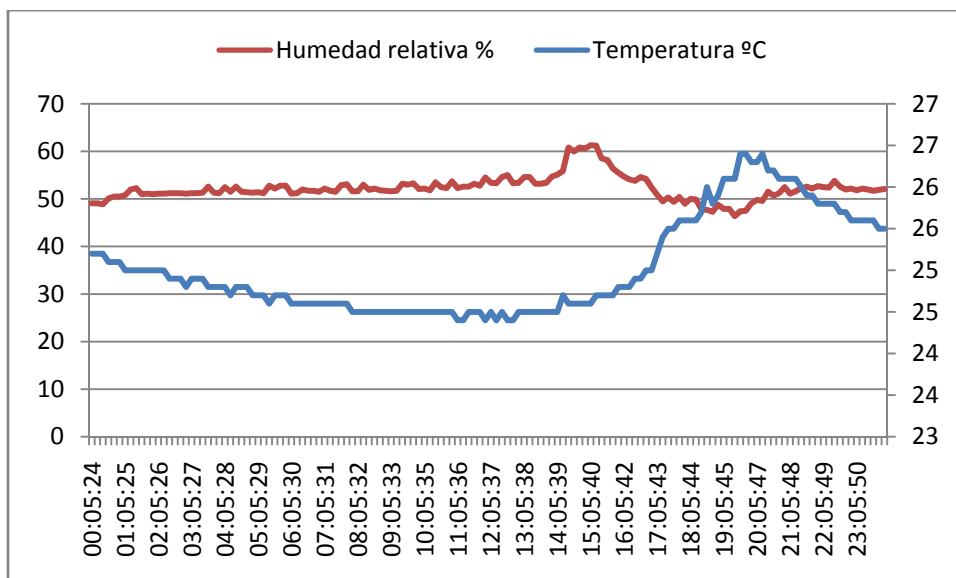


Gráfico 29: Temperatura y humedad relativa sensor IO16 (ambiente interior) (elaboración propia)

Llama la atención los registros del sensor IO6, embebido en el interior del muro a 10 cm de profundidad desde la cara interna del cerramiento. Los datos muestran como los valores de temperatura y humedad discurren prácticamente paralelos entre sí a lo largo de la jornada sin a penas variación.

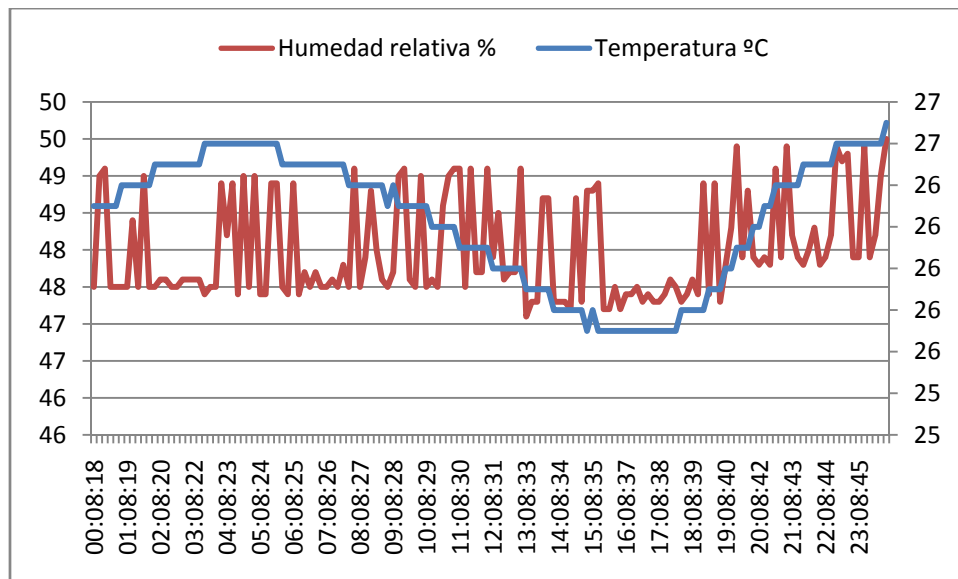


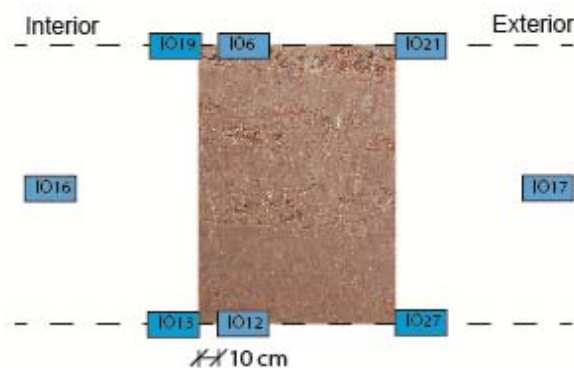
Gráfico 30: Temperatura y humedad relativa sensor IO6 (interior muro h=2.20 m) (elaboración propia)

Durante el período de monitorización del presente caso de estudio, se produjo un cambio brusco en las condiciones climatológicas completamente atípico teniendo en cuenta la época del año, por lo que se optó también por seleccionar y analizar el comportamiento del cerramiento para el día con los registros más bajos de temperatura, siendo este el 13 de agosto.

### 5.2.2. Lecturas 13 de agosto de 2015

El 13 de Agosto amaneció siendo un día gris, con precipitaciones durante la madrugada en forma de chaparrones esporádicos, pero intensos.

El registro de los sensores de exterior, difieren completamente de los datos registrados tan sólo dos días antes. Las amplias oscilaciones existentes para los valores de temperatura y humedad, sobre todo en las horas centrales del día, pasan a ser mucho más lineales.



Las gráficas obtenidas de los sensores de referencia según el esquema adjunto superior, nos muestran unos valores de temperatura mucho más reducidos que para el caso del ejemplo anterior y con valores en torno al 18 - 20% que se mantienen durante toda la jornada.

Los registros de humedad relativa, también sufren un cambio drástico con respecto a la jornada del 11 de agosto, los cuales presentaban grandes intervalos de oscilación siendo los valores mínimos los correspondientes a las horas centrales del día, momento en el cual también se registraban las temperaturas máximas. En cuanto a los valores mínimos, mientras en el caso anterior se situaban en las primeras horas de la mañana, coincidiendo además con los registros más bajos en las temperaturas, en este caso se alcanzan en torno a las 3:00 de la madrugada, momento en el cual se registraron los valores más intensos en las precipitaciones.

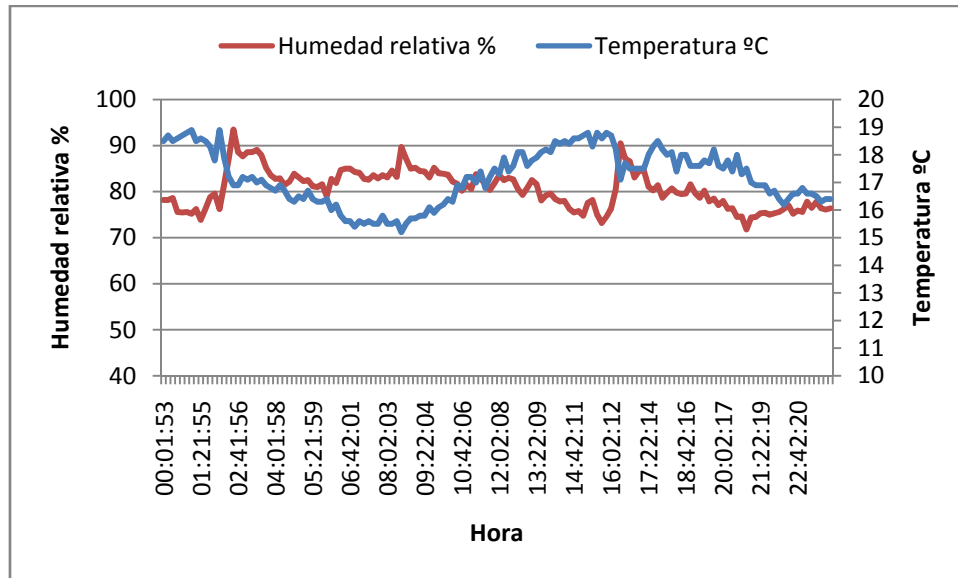


Gráfico 31: Temperatura y humedad relativa sensor IO21 (exterior h=2.20 m) (elaboración propia)

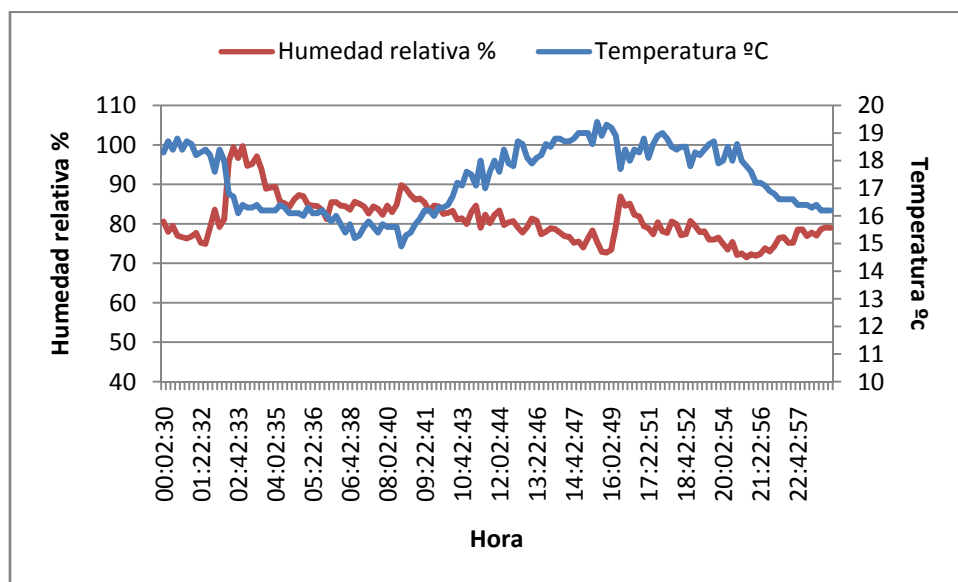


Gráfico 32: Temperatura y humedad relativa sensor IO27 (exterior h=1.20 m) (elaboración propia)

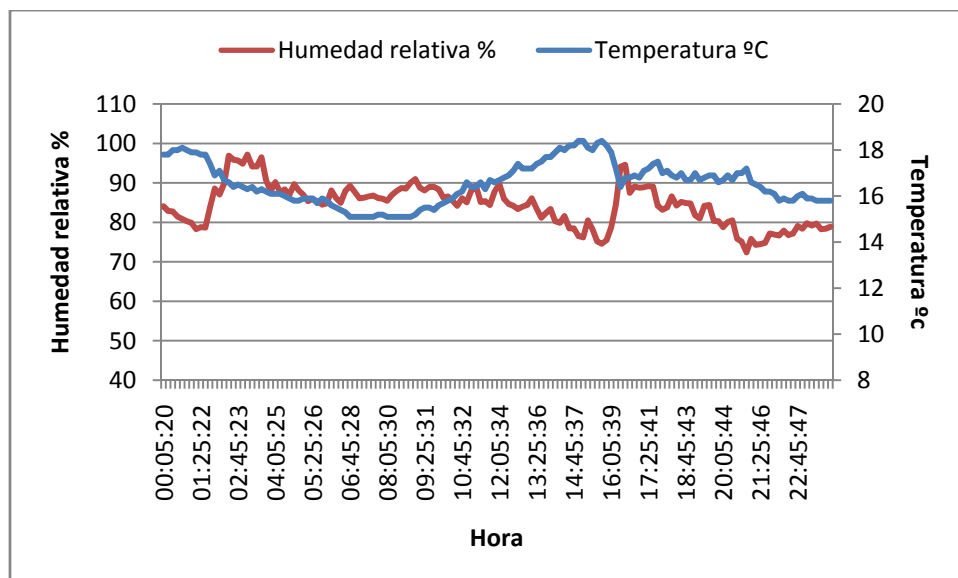


Gráfico 33: Temperatura y humedad relativa sensor IO17 ( ambiente exterior) (elaboración propia)

Los sensores ubicados en el interior de la estancia, a pesar del cambio acaecido en las condiciones climatológicas exteriores, mantienen la misma tendencia lineal, con temperaturas en torno a los 25 °C unos valores de humedad en torno al 50%

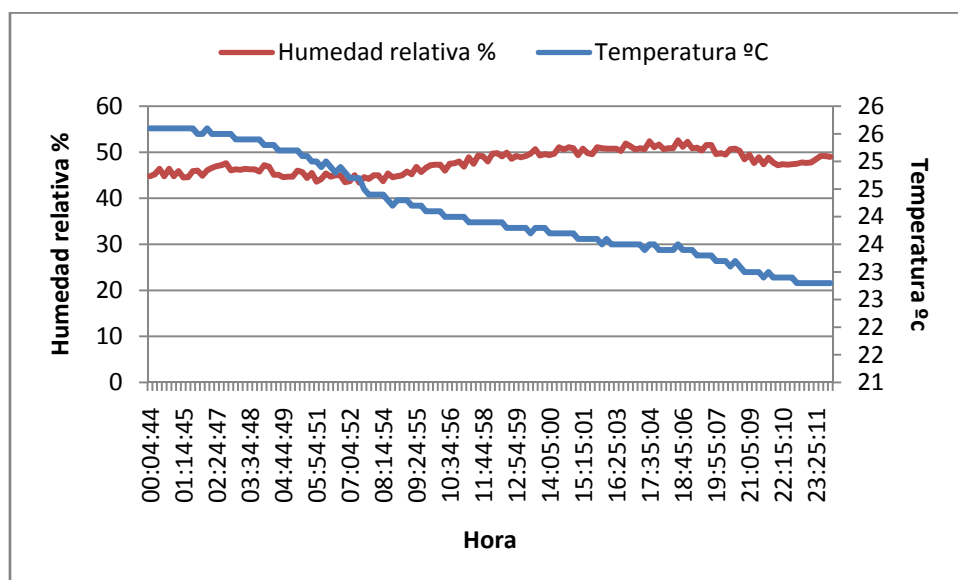


Gráfico 34: Temperatura y humedad relativa IO19 (h=2.20 m interior) (elaboración propia)

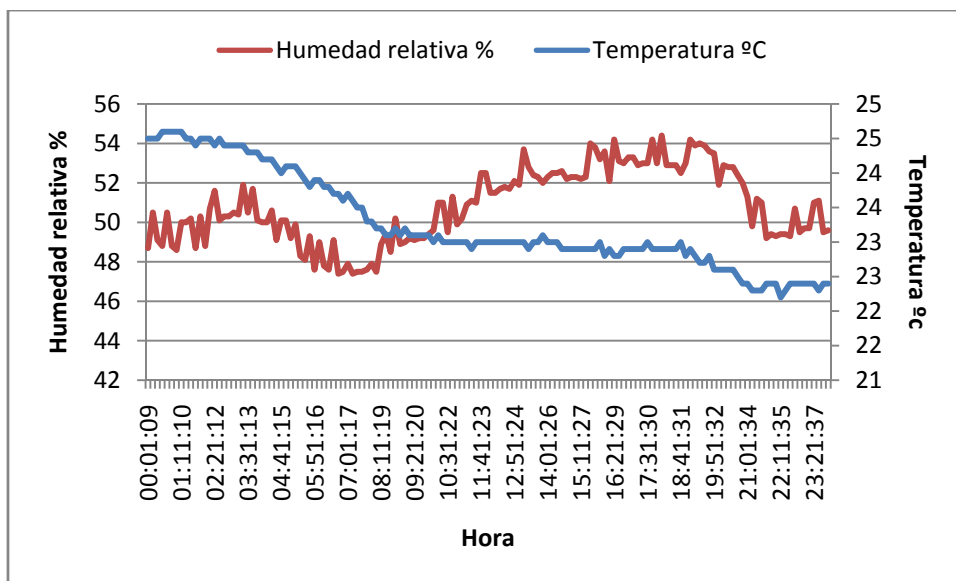


Gráfico 35: Temperatura y humedad relativa IO13 (h=1.20 m, interior) (elaboración propia)

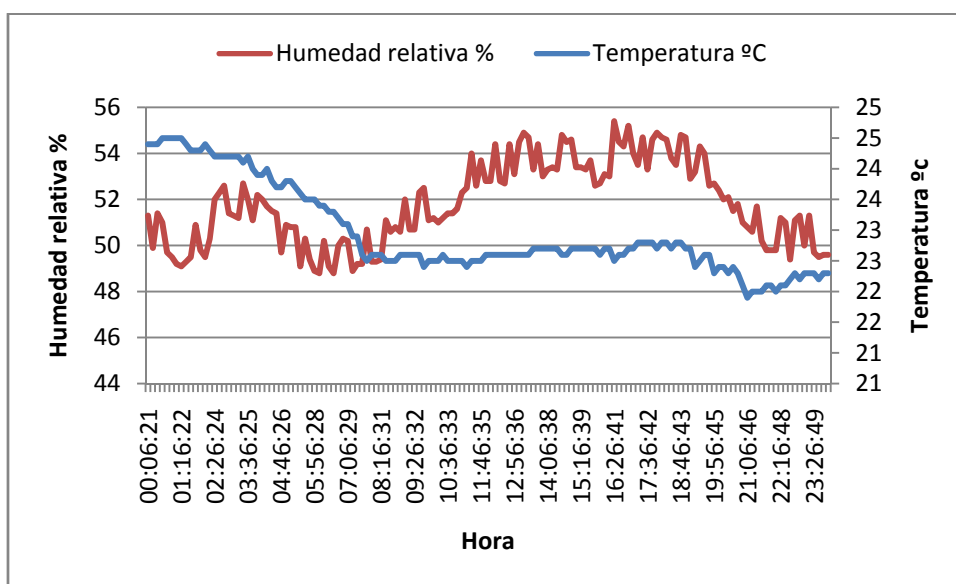


Gráfico 36: Temperatura y humedad relativa IO16 (ambiente interior) (elaboración propia)

En el caso del sensor interior al cerramiento, el IO6, los registros no sufren modificaciones aparentes.

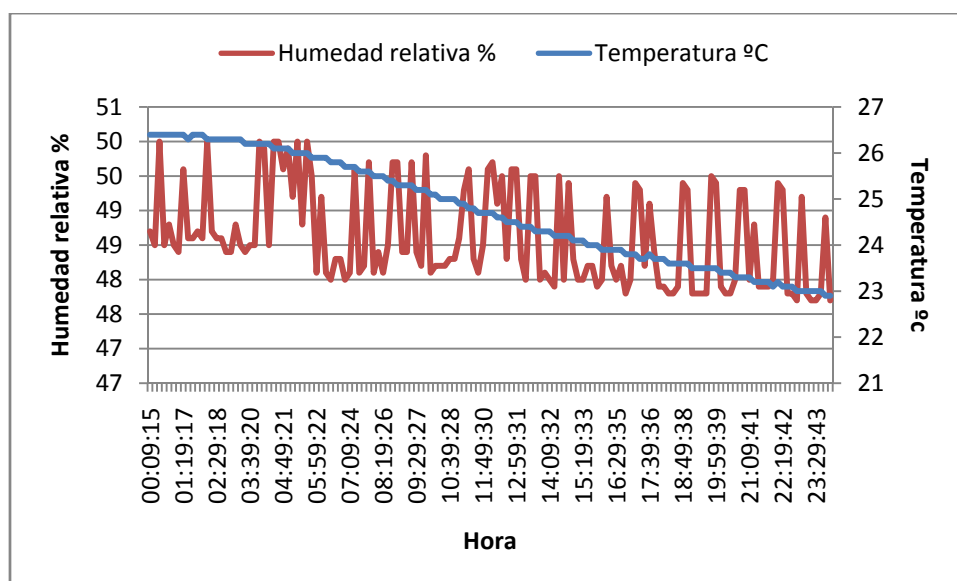


Gráfico 37: Temperatura y humedad relativa IO6 (h=2.20 m, interior muro) (elaboración propia)

### 5.3. ANÁLISIS DE TEMPERATURAS

A continuación, en la tabla adjunta se muestran los valores máximos, mínimos y medios de temperatura ambiente exterior para los días objeto de estudio. Llama la atención que los valores extremos se produzcan con sólo dos días de diferencia, en los que se produjo un salto térmico entre uno y otro día en sus temperaturas máximas de 13.9 °C, mientras que en las mismas la variación es 3.30 °C.

SENSOR IO17	11/8/2015	Hora	13/8/2015	Hora
Temp. máxima °C	32,300	18:14:44	18,400	14:55:37
Temp. media °C	23,498	-	16,560	-
Temp. mínima °C	18.40	05:54:29	15,100	06:45:28

Tabla 39: IO17. Temperaturas exteriores 11 y 13/8/2015

Debido al coste económico que suponía la instalación de un pirómetro en el emplazamiento, los datos correspondientes a radiación solar se toman de la estación meteorológica más próxima y propiedad de Meteogalicia, la Estación Marroxo.

Las siguientes figuras muestran la relación entre las temperaturas exteriores registradas en el emplazamiento, la radiación solar incidente y la temperatura superficial de fachada. Las lecturas de los sensores mostraron correlación entre los valores interiores y exteriores registrados y la radiación solar.

Como se puede observar, los valores máximos de temperatura se alcanzan durante la tarde, esto es debido a la orientación sur de la fachada.

### 5.3.1. Análisis de temperaturas 11 de agosto de 2015

El primer gráfico muestra los valores de radiación solar para la fecha de estudio en contraposición con los valores de temperatura registrados por nuestro sensor de ambiente exterior IO17. Como se ha indicado en capítulos anteriores, debido al coste de un pirómetro que nos permitiese registrar los valores de radiación en el emplazamiento se ha optado por emplear los datos registrados por Meteogalicia en la estación más próxima al emplazamiento del edificio, la Estación Marroxo, situada en Monforte de Lemos.

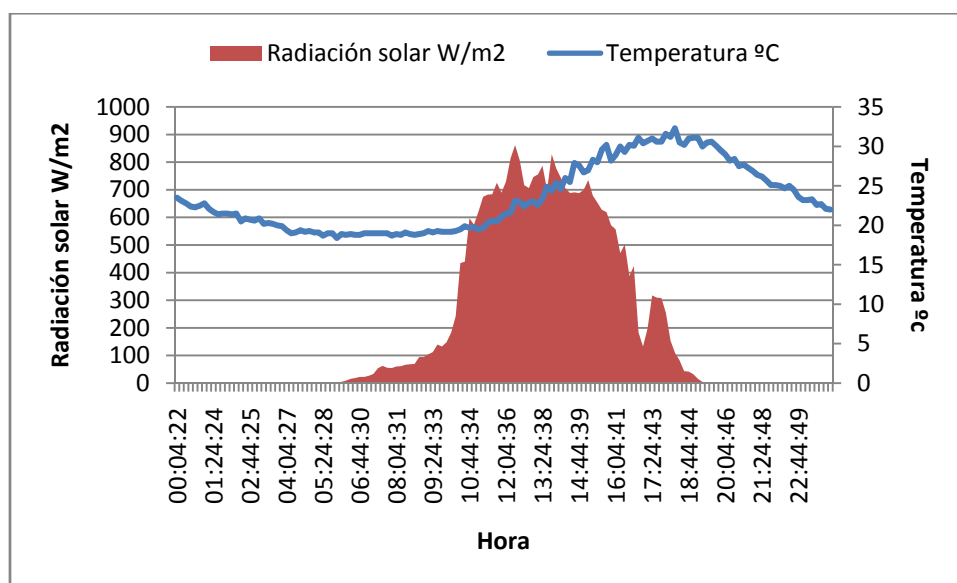
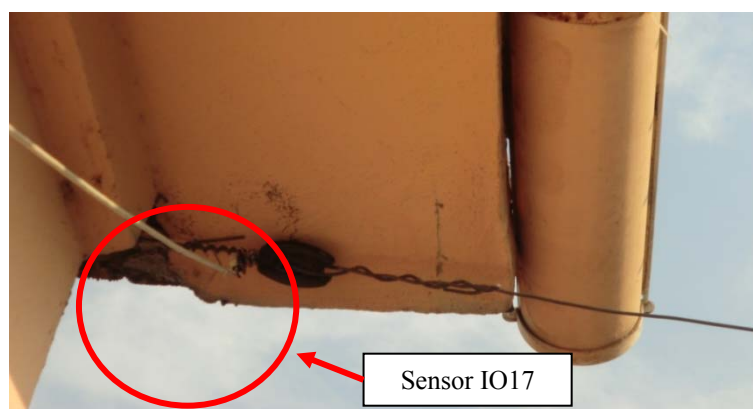


Gráfico 38: Radiación solar (W/m2) 11/8/2015 (www.meteogalicia.es)

Como se puede apreciar en la gráfica, mientras que los valores máximos de radiación global son registrados en torno a las 12:00, para el caso de nuestro sensor los valores máximos de temperatura (32,3 °C) no son alcanzados hasta las 18:00. Esto se debe sin duda a la especial ubicación de nuestro sensor ya que, a fin de situarlo en una posición en la que no fuese alcanzado directamente por las inclemencias meteorológicas fue ubicado bajo el alero de la fachada principal del edificio objeto de estudio, de orientación SO.



Fotografía 99: Ubicación sensor IO17 (ambiente exterior) (elaboración propia)



Fotografía 100: Posicionamiento sensor IO17 (ambiente exterior) (elaboración propia)

La estación Marroxo, a pesar de estar ubicada en la misma localidad del edificio objeto de estudio, se ubica en una zona de montaña, a unos 645 m de altitud, por lo que los valores registrados por la misma en lo que a humedad y temperatura se refiere suelen estar bastante alejados de los registrados en el casco urbano, a tan sólo 360 m de altitud (Guitian Ojea, Carballas, & Muñoz Taboadela, 1982)

Si comparamos los registros de temperaturas de esta estación para la fecha de referencia y lo comparamos con los registrados por nuestros sensores podemos apreciar que existe una diferencia más que notable, así:

11 Agosto 2015		Hora
<b>SENSOR IO17 Ambiente exterior.</b>		
Temperatura máxima °C	32,300	18:14:44
Temperatura media °C	23,498	-
Temperatura mínima °C	18.40	05:54:29
<b>Estación Marroxo (Meteogalicia)</b>		
Temperatura máxima °C	28,100	-
Temperatura media °C	19,700	-



Temperatura mínima °C	15,500	-
-----------------------	--------	---

Se registran unas diferencias en las lecturas máximas de 4.2 °C y de 2.9 °C en las mínimas. Este hecho se constata en los registros del resto de los sensores de temperatura instalados.

#### 5.3.1.1. Evolución de las temperaturas exteriores:

El sensor IO17 se corresponde con el sensor ambiente exterior, mientras que el IO21 se corresponde con el instalado en la superficie exterior del muro a una altura de 2.20 m con respecto al forjado de la planta segunda y el IO27 a una altura de 1.20 sobre la misma planta de referencia. Como se puede apreciar en el gráficos adjuntos, las temperaturas registradas por ambos dispositivos discurren parejas, aunque los sensores IO21 e IO27 muestran lecturas bastante superiores, sobre todo para el caso del sensor IO27.

11 Agosto 2015		Hora
<b>SENSOR IO17 Ambiente exterior.</b>		
Temperatura máxima °C	32,300	18:14:44
Temperatura media °C	23,498	-
Temperatura mínima °C	18.40	05:54:29
<b>SENSOR IO21 Superficie exterior h=2.20 m.</b>		
Temperatura máxima °C	37,000	16:11:15
Temperatura media °C	25,494	
Temperatura mínima °C	19,700	05:51:02
<b>SENSOR IO27 Superficie exterior h=1.20 m.</b>		
Temperatura máxima °C	42,200	16:11:54
Temperatura media °C	26,783	-
Temperatura mínima °C	19,300	8:11:41

Tabla 40: IO17, IO21 e IO27. Temperaturas máximas, medias y mínimas (11/8/2015)

Los altos registros en las temperaturas del sensor IO27, posiblemente sea debido a la radiación que recibe por reflexión de la cubierta de la vivienda vecina ya que como se puede apreciar en la gráfica adjunta, hasta el momento en que comienza a incidir la radiación solar sobre el paramento de manera intensa, la lectura de los sensores IO27 e IO21 discurre prácticamente coincidente.

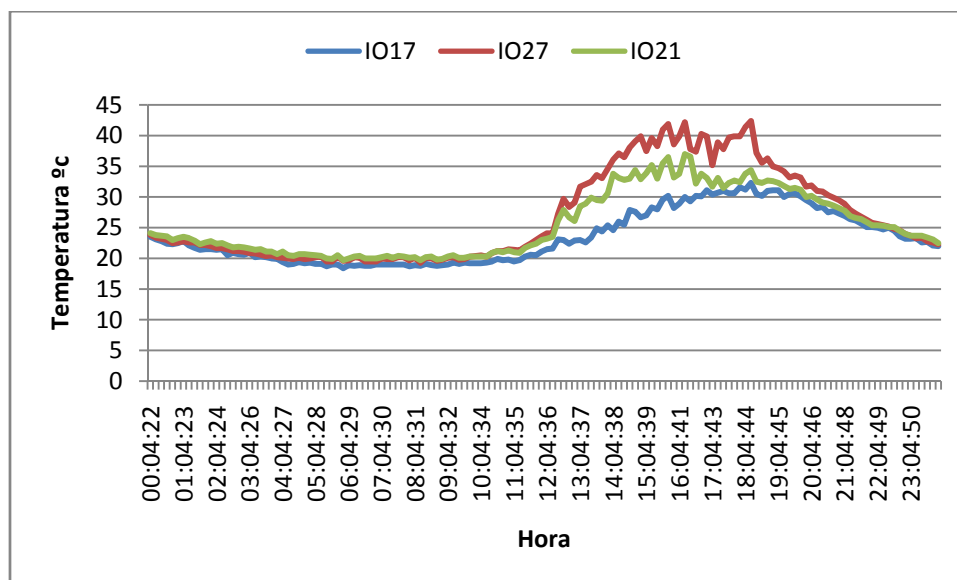


Gráfico 39: Temperatura IO17, IO27 e IO21 (11/8/2015) (elaboración propia)

### 5.3.1.2. Evolución de las temperaturas interiores:

En cuanto a las temperaturas interiores, cabe destacar que, tanto las temperaturas registradas en el interior del muro, las registradas en la superficie del mismo así como las de ambiente interior presentan unas lecturas bastante estables a lo largo de toda la jornada, al contrario de lo que ocurre con las lecturas del exterior. Esto no hace sino poner de manifiesto el funcionamiento del muro a través de la capacidad calorífica de la construcción de tierra.

11 Agosto 2015		Hora
<b>SENSOR IO6Interior muro 10 cm (h=2.20 m).</b>		
Temperatura máxima °C	26.7	23:58:46
Temperatura media °C	26,237	-
Temperatura mínima °C	25,700	14:58:35

<b>SENSOR IO19 Superficie interior (h= 2.20 m).</b>		
Temperatura máxima °C	27,000	19:34:09
Temperatura media °C	25,888	-
Temperatura mínima °C	25,300	13:44:02
<b>SENSOR IO13 Superficie interior (h= 1.20 m).</b>		
Temperatura máxima °C	26,000	19:30:36
Temperatura media °C	24,802	-
Temperatura mínima °C	24,400	08:50:23
<b>SENSOR IO16 Ambiente interior</b>		
Temperatura máxima °C	26,400	19:35:46
Temperatura media °C	25,025	-
Temperatura mínima °C	24,400	11:05:36

Tabla 41: IO6, IO19, IO13 e IO16 Temperaturas máximas, medias y mínimas (11/8/2015)

Cabe mencionar la diferencia existente entre las horas en las que se han registrado los valores mínimos de temperatura para los sensores IO19 e IO13 (ambos ubicados en la superficie del muro). El sensor IO13 muestra su mínimo registro a las 13:44:02, valor nada habitual ya que lo lógico es que se mostrase hacia las primeras horas de la mañana. Analizados los registros para cada uno de ellos se puede constatar que la oscilación de las temperaturas a lo largo de la mañana es tan mínima, de tan solo 0,3 décimas de grado, que dicha diferencia no se considera significativa.

Del siguiente gráfico se puede extraer que, la temperatura ambiente interior es siempre la menor de las tres registradas, llegando a ser casi coincidente con la interior del cerramiento hacia las últimas horas del día.

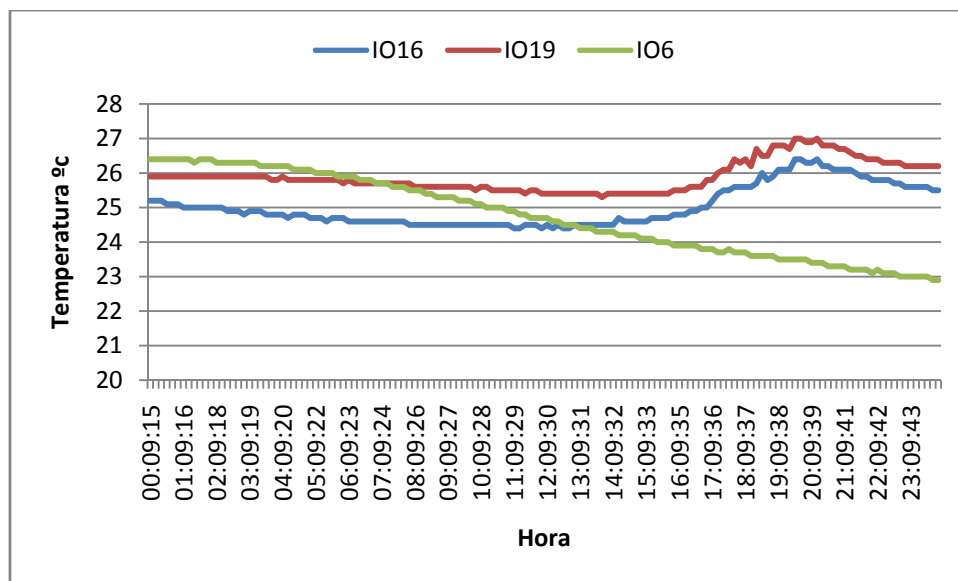


Gráfico 40: Temperatura IO16,IO19 e IO6 (elaboración propia)

Contraponiendo las lecturas del sensor IO21 (superficie exterior) con el IO19 (superficie interior), ambos situados a 2.20 m sobre el nivel del suelo de la segunda planta de vivienda objeto de estudio:

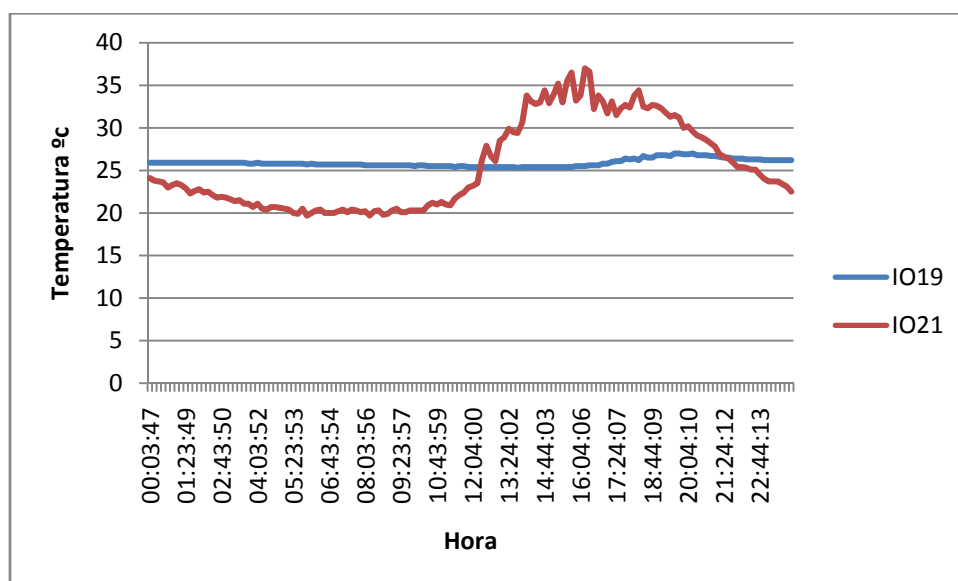


Gráfico 41: Desfase térmico 11/8/2015 (elaboración propia)

SENSOR IO21 Superficie exterior.		
Temperatura máxima °C	37,000	16:11:15
Temperatura media °C	25,494	-

Temperatura mínima °C	19,700	05:51:02
-----------------------	--------	----------

<b>SENSOR IO19 Superficie interior.</b>		
Temperatura máxima °C	27,000	19:34:09
Temperatura media °C	25,888	-
Temperatura mínima °C	25,300	13:44:02

A pesar de que las dos curvas se refieren a un mismo período de 24 horas, existen un par de diferencias muy significativas entre ellas:

1. El pico máximo de la curva que representa al sensor IO21 está ligeramente retrasado con respecto a la del sensor IO19. Este "retraso" de una gráfica con respecto a la otra es lo que se conoce como desfase térmico ( $\Phi$ ) y se mide en horas. Mientras el sensor IO21 registra su valor máximo de temperatura a en torno a las cuatro de la tarde, el sensor IO19 no lo hace hasta las siete y media. Esto significa que el desfase térmico entre las dos caras del cerramiento es de casi 3.5 horas.
2. Analizando las temperaturas promedio para cada uno de ellos se puede constatar que, a pesar de ser bastante similares, la amplitud u oscilación de la gráfica perteneciente al sensor IO21 es mayor que la del sensor IO19, lo que significa que el salto térmico existente a lo largo del día es mayor para el IO21.

<b>VALORES ESTADÍSTICOS TEMPERATURA</b>	<b>IO21</b>	<b>IO19</b>
MIN	19.700	25.300
MAX	37.000	27.000
MEAN	25.490	25.890
MEDIAN	23.500	25.800

MODE	20.300	25.400
STD	5.217	0.444
RANGE	17.300	1.700

Tabla 42: Valores estadísticos sensor IO21 e IO19 (elaboración propia)

### 5.3.2. Análisis de temperaturas 13 de Agosto de 2015

Analizando los datos correspondientes a la radiación para el pasado 13 de Agosto, lo primero que nos llama la atención es la notable diferencia con los registrados el pasado día 11. Esto se debe a que se trataba de un día cubierto por la nubes, en el que además se produjeron algunas precipitaciones nocturnas y un descenso brusco en temperaturas, situación completamente anómala para la época del año en la que se realiza el presente estudio.

Este análisis comienza siguiendo las mismas pautas que para el ejemplo anterior, por lo que lo primero será contraponer los valores de temperaturas registradas por nuestro sensores con lo de radiación solar ofrecidos por la estación Marroxo de Meteogalicia:

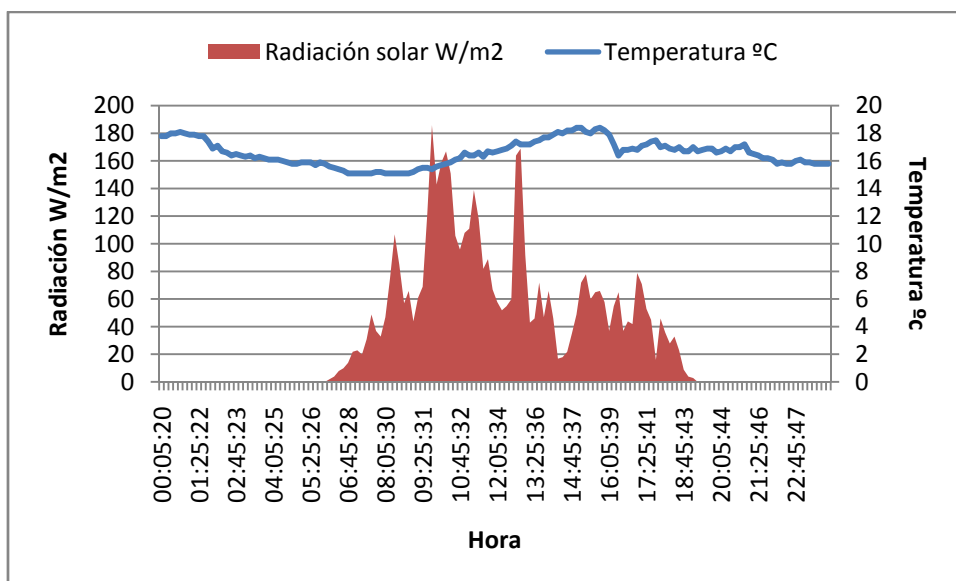


Gráfico 42: Radiación solar (W/m2) 13/8/2015 ([www.meteogalicia.es](http://www.meteogalicia.es))

Como se puede apreciar en la gráfica, mientras que los valores máximos de radiación global descienden notablemente con respecto al caso anterior, se registran en torno a las 12:00, para el caso de nuestro sensor los valores máximos de temperatura (18,400 °C) en este caso se alcanzan en torno a las 15:00 ya que al no existir un impacto directo del sol, la ubicación de nuestro sensor en el alero de la fachada SO pasa a tener una menor relevancia que para el caso anterior.

Si comparamos los registros de temperaturas de esta estación para la fecha de referencia y lo comparamos con los registrados por nuestros sensores apreciaremos las diferencias entre los valores registrados tanto por la estación como por el sensor IO17, así:

<b>13 Agosto 2015</b>		<b>Hora</b>
<b>SENSOR IO17 Ambiente exterior.</b>		
Temperatura máxima °C	18,400	14:55:37
Temperatura media °C	16,560	-
Temperatura mínima °C	15,100	06:45:28
<b>Estación Marroxo (Meteogalicia)</b>		
Temperatura máxima °C	14,800	-
Temperatura media °C	12,900	-
Temperatura mínima °C	10,700	-

Se registran unas diferencias en las lecturas máximas de 3.6 °C y de 4.4 °C en las mínimas.

#### 5.3.2.1. Evolución de las temperaturas exteriores

El sensor IO17 se corresponde con el sensor ambiente exterior, mientras que el IO21 se corresponde con el instalado en la superficie exterior del muro a una altura de 2.20 m con respecto al forjado de la planta segunda y el IO27 a una altura de 1.20 sobre la misma planta de referencia . Como se puede apreciar en el gráfico adjunto, las temperaturas registradas por ambos dispositivos discurren parejas, aunque los sensores IO21 e IO27 muestran lecturas bastante superiores, sobretodo para el caso del sensor IO27.

13 Agosto 2015		Hora
<b>SENSOR IO17 Ambiente exterior.</b>		
Temperatura máxima °C	18,400	14:55:37
Temperatura media °C	16,560	-
Temperatura mínima °C	15,100	06:45:28
<b>SENSOR IO21 Superficie exterior (h=2.20 m).</b>		
Temperatura máxima °C	18,900	01:01:54
Temperatura media °C	17,199	-
Temperatura mínima °C	15,200	08:32:03
<b>SENSOR IO27 Superficie exterior (h=1.20 m).</b>		
Temperatura máxima °C	19,400	15:32:48
Temperatura media °C	17,318	-
Temperatura mínima °C	14,900	08:32:40

Tabla 43: IO17, IO21 e IO27. Temperaturas máximas, medias y mínimas (11/8/2015)

En esta ocasión, los saltos térmicos existentes entre las temperaturas máximas y mínimas de los sensores exteriores instalados son mucho menos pronunciados que en el caso anterior, aún así, el sensor IO27 instalado a 1.20 m de altura muestra un valor registrado ligeramente superior (0.3 °C) con respecto al IO21, lo que nos lleva a reafirmarnos en la influencia que la cubierta de la vivienda vecina ejerce sobre nuestro sensor.

Comparando los valores de los registros con los de tan sólo dos días antes se puede apreciar un más que notable salto térmico de unos 14 °C en las temperaturas máximas exteriores. En este caso, sin embargo, la diferencia de temperaturas a lo largo de toda la jornada de 3.5 y 4.5 °C para los sensores IO27 e IO21 °C.



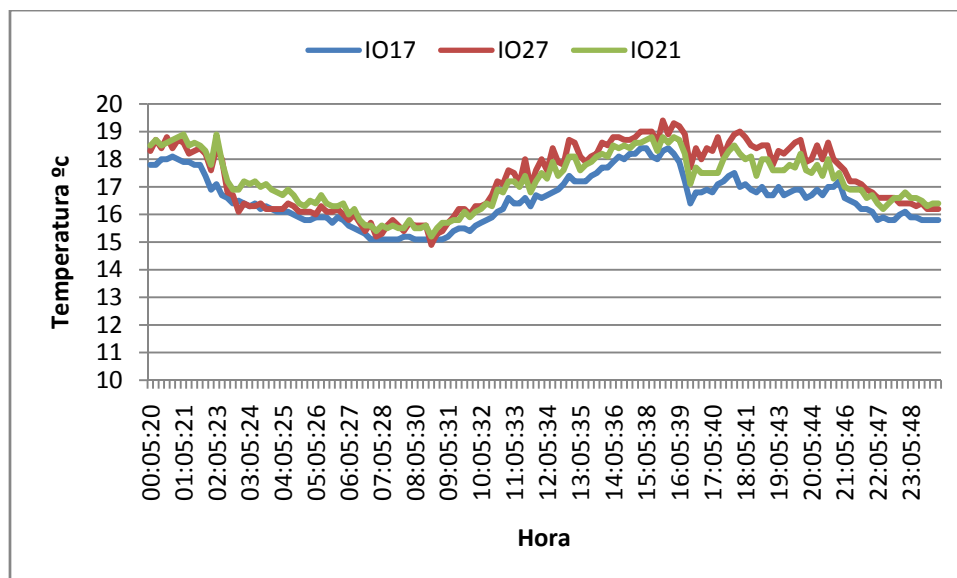


Gráfico 43: Temperatura IO17, IO27 e IO21 (13/8/2015)

### 5.3.2.2. Evolución de las temperaturas interiores:

En cuanto a las temperaturas interiores, cabe destacar que, tanto las temperaturas registradas en el interior del muro, las superficiales y las de ambiente interior presentan unas lecturas bastante estables a lo largo de toda la jornada, al contrario de lo que ocurre con las lecturas del exterior. Esto no hace sino pone de manifiesto la capacidad calorífica de la construcción de tierra.

13 Agosto 2015		Hora
<b>SENSOR IO6 Interior muro 10 cm (h=2.20 m).</b>		
Temperatura máxima °C	26,400	00:09:15
Temperatura media °C	24,737	-
Temperatura mínima °C	22,900	23:49:44
<b>SENSOR IO19 Superficie interior (h= 2.20 m).</b>		
Temperatura máxima °C	25,600	00:04:44
Temperatura media °C	24,113	-

Temperatura mínima °C	22,800	22:45:11
<b>SENSOR IO13 Superficie interior (h= 1.20 m).</b>		
Temperatura máxima °C	24,600	00:31:10
Temperatura media °C	23,266	-
Temperatura mínima °C	22,200	22:11:35
<b>SENSOR IO16 Ambiente interior</b>		
Temperatura máxima °C	24,500	00:36:21
Temperatura media °C	22,951	-
Temperatura mínima °C	21,900	21:06:46

Tabla 44: IO6, IO19, IO13 e IO16 Temperaturas máximas, medias y mínimas interiores(13/8/2015)

Si efectuamos la comparación de los registros entre las condiciones ambientales exteriores para el día 11 y posteriormente del día 13 podemos comprobar cómo a pesar de tratarse de situaciones completamente dispares, los valores para la temperatura interior de la estancia siguen manteniéndose constantes a lo largo del día y la variación para las temperaturas máximas es de poco más de 3°C.

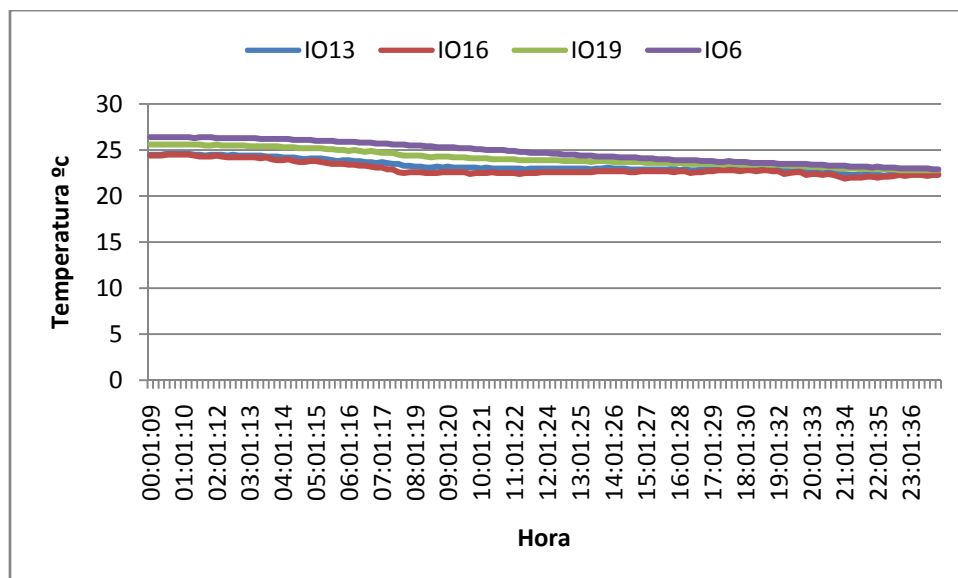


Gráfico 44: Temperatura IO13, IO16, IO19 e IO6.

Si como en el caso anterior, contraponemos las lecturas del sensor IO21 (superficie exterior) con el IO19 (superficie interior), ambos situados a 2.20 m sobre el nivel del suelo de la segunda planta de vivienda objeto de estudio podremos conocer el valor del desfase térmico:

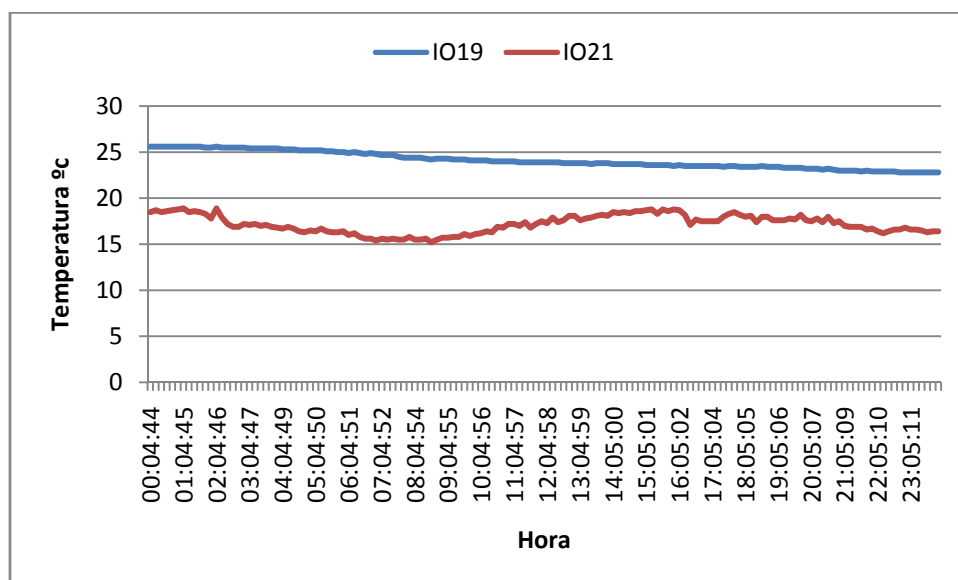


Gráfico 45: Desfase térmico 13/8/2015

<b>SENSOR IO21 Superficie exterior.</b>		
Temperatura máxima °C	18,900	01:01:54
Temperatura media °C	17,199	-
Temperatura mínima °C	15,200	08:32:03
<b>SENSOR IO19 Superficie interior.</b>		
Temperatura máxima °C	25,600	00:04:44
Temperatura media °C	24,113	-
Temperatura mínima °C	22,800	22:45:11

En este caso, el flujo térmico se invierte ya que los valores registrados para las temperaturas interiores siempre son superiores a los de la temperatura exterior, mostrando además una tendencia al descenso de las temperaturas interiores debido a la inversión de dicho flujo.

<b>VALORES ESTADÍSTICOS TEMPERATURA</b>	<b>IO21</b>	<b>IO19</b>
MIN	15,200	22,800
MAX	18,900	25,600
MEAN	17,200	24,110
MEDIAN	17,200	23,900
MODE	16,400	23,500
STD	0,999	0,8994
RANGE	3,7	2,800

Tabla 45: Valores estadísticos sensor IO21 e IO19 (elaboración propia)

### 5.3.3. Conclusiones análisis temperatura:

- A. Los muros de tapia tienen un bajo comportamiento en estado estacionario debido a su resistencia térmica y aunque la misma mejora a medida que se incrementa el espesor del muro, incluso en un cerramiento de 70 cm de espesor como el analizado, no se alcanzan los requerimientos establecidos en la normativa de edificación.
- B. El día 11 de agosto, los valores máximos y mínimos de temperatura según los datos registrados por Meteogalicia en la Estación Marroxo fueron de 28.10 y 15.50 °C mientras que los registrados en el emplazamiento por el sensor IO17 fueron de 32.3 y 18.4 °C respectivamente.
  - i. El día 13 de agosto, los valores máximos y mínimos de temperatura según los datos registrados según Meteogalicia fueron de 14.80 y 10.20 °C mientras que los registrados en el emplazamiento por el sensor IO17 fueron de 18.40 y 15.10 °C respectivamente.
  - ii. Esto no hace sino poner de manifiesto las variaciones térmicas que para una misma localidad se pueden producir en función del emplazamiento.
- C. Para el día 11 de agosto mientras en el exterior de la viviendas las temperaturas varían a lo largo de la jornada entre los 32.3 °C de valor máximo y los 18.40 °C de mínimas, las variaciones en el interior de la misma oscilan entre los 26.40 y 24.40 °C. Es decir, a pesar de existir un salto térmico en el exterior de casi 14 °C en el exterior, en el interior es de 2 °C. La gran diferencia de temperaturas entre el interior y exterior se debe a la capacidad calorífica del muro de tapia, que hace que cada pequeña capa de material sea capaz de absorber una cantidad de calor y aumentar su temperatura antes de que pueda transmitirla a la capa siguiente de material.
- D. El 13 de agosto se produce un cambio más que notable en las temperaturas exteriores pasando a existir un salto térmico entre los valores máximos del día 13 con respecto a los del 11 de 13.9 °C. Se trata de una situación completamente anómala para la época del año en la que se realñiza el presente estudio.
- E. El día 13 de agosto se registra en el exterior de la viviendas una variación de las temperaturas a lo largo de la jornada entre los 18.40 °C de valor máximo y los 15.10 °C de mínimas. Las variaciones en el interior de la misma oscilan entre los 24.50 y 21.900 °C. Es decir, a pesar de invertirse la situación con respecto al 11 de agosto, la vivienda sigue manteniendo una temperatura interior estable y agradable. Esto sucede como consecuencia de la capacidad calorífica del elemento constructivo.
- F. El día 11 de agosto existe el desfase térmico entre el interior y el exterior de la estancia es de 3.5 horas
- G. El 13 de agosto, debido al descenso generalizado de las temperaturas, el flujo térmico del muro se invierte pasando a funcionar de exterior a interior.
- H. El 13 de agosto se muestra una tendencia descendente en las temperaturas interiores debido a la inversión del flujo térmico, como consecuencia del descenso de las temperaturas exteriores.
- I. El 11 de agosto el sensor IO27 (superficie exterior con h=1.20 m) registra un valor máximo de 42.20 °C mientras que el sensor IO21 (superficie exterior con h=2.20 m) registra un valor máximo de tan solo 37 °C.

El 13 de agosto el sensor IO27 (superficie exterior con  $h=1.20$  m) registra un valor máximo de  $19.40^{\circ}\text{C}$  mientras que el sensor IO21 (superficie exterior con  $h=2.20$  m) registra un valor máximo de tan solo  $18.90^{\circ}\text{C}$ .

A pesar de verse reducida la diferencia de temperaturas entre los sensores IO27 e IO21 en función del día analizado, los registros del sensor IO27 siempre son superiores a los del IO21. Esto nos lleva a extraer como conclusión que la cubierta de la vivienda contigua, situada unos 50 cm por debajo del sensor IO27 produce una influencia en el mismo por radiación.

#### 5.4. ANÁLISIS DE LA HUMEDAD RELATIVA

<b>SENSOR IO17</b>	<b>11/8/2015</b>	<b>Hora</b>	<b>13/8/2015</b>	<b>Hora</b>
Humedad relativa máxima %	82,600	05:24:28	97,200	03:05:24
Humedad relativa media %	63,735	-	84,331	-
Humedad relativa mínima %	35.700	17:54:44	72,400	20:55:45

Tabla 46: Humedad máxima, media y mínima 11 y 13/8/2015.

A la hora de establecer unas variables de análisis para los registros de humedad de los sensores, se diseña una metodología similar a la desarrollada por García Morales, López González, & Collado Gómez(2012) en la cual se establecen una serie de hipótesis de partida y establecer unas variables de medida de modo que nos permitan realizar un posterior análisis. Para nuestro caso de estudio las hipótesis de partida son:

- En el interior de un edificio húmedo, la humedad es mayor que en el exterior.
- Cuanto más cerca está un foco de evaporación, mayor es la humedad del aire.
- Cuando en una estancia el aire en contacto con la superficie de un cerramiento está más húmedo que el de la propia sala, significa que ese cerramiento está evaporando.

Y las variables de observación en relación a la ubicación de nuestros sensores son:

- Variable ambiente: interior y exterior.
- Variable altura: en cm sobre la cota del suelo. Se toman lecturas a 1.20 y 2.20 cm.
- Variable posición: en el interior del cerramiento y sobre las superficies del cerramiento.

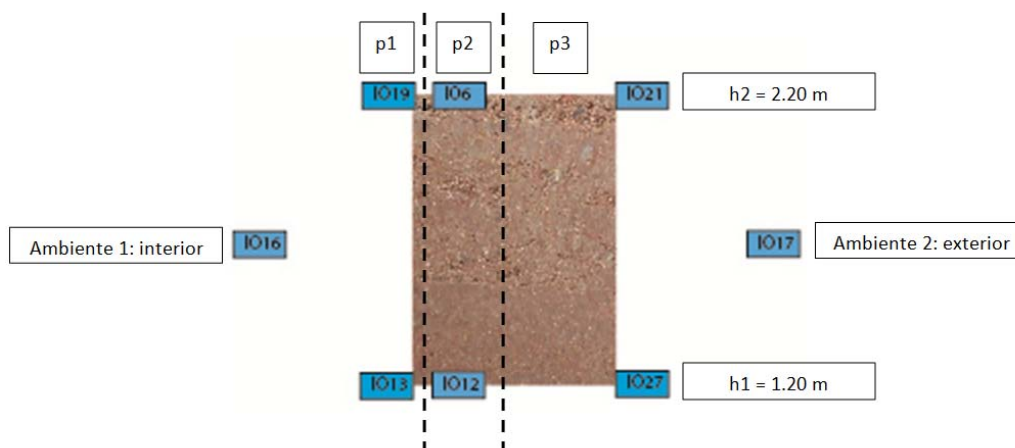


Ilustración 32: Variables de observación humedad relativa (elaboración propia)

### 5.4.1. Humedad 11 de agosto de 2015

#### 5.4.1.1. Variable ambiente:

Si analizamos los registros de los sensores IO16 e IO17 veremos que los valores tomados por el sensor IO17 presentan una mayor fluctuación a lo largo de la jornada que los registrados en el interior de la vivienda por el sensor IO16. Si verificamos además los gráficos adjuntos en el apartado 5.2 para el sensor IO16 veremos que además que los valores coincidentes con los menores registros de humedad ambiente exterior, coinciden con los de las temperaturas máximas. De acuerdo con nuestra primera hipótesis, esto pone de manifiesto que no se trata de un edificio húmedo ya que de lo contrario los valores de humedad registrados en el interior de la vivienda superarían a los exteriores.

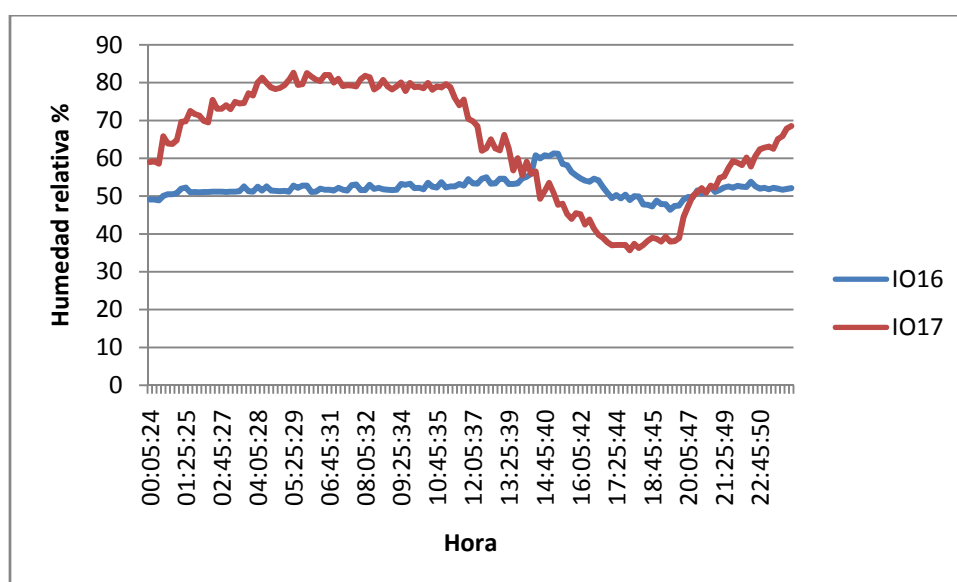


Gráfico 46: Humedad relativa IO16 e IO17 (11/8/2015) (elaboración propia)

#### 5.4.1.2. Variable altura:

En el gráfico adjunto, se observan las lecturas para los dos sensores DHT22 ubicados en la cara interior del cerramiento estando el IO13 a 1.20 m sobre el suelo y el IO19 a 2.20 cm. se puede extarar que, a medida que aumentamos la altura, se reduce el contenido de humedad alrededor de un 5%, manteniéndose esta diferencia a lo largo de toda la jornada. Según nuestra segunda hipótesis, esto nos indica que existe un foco de evaporación más próximo al sensor IO13 que al IO19.

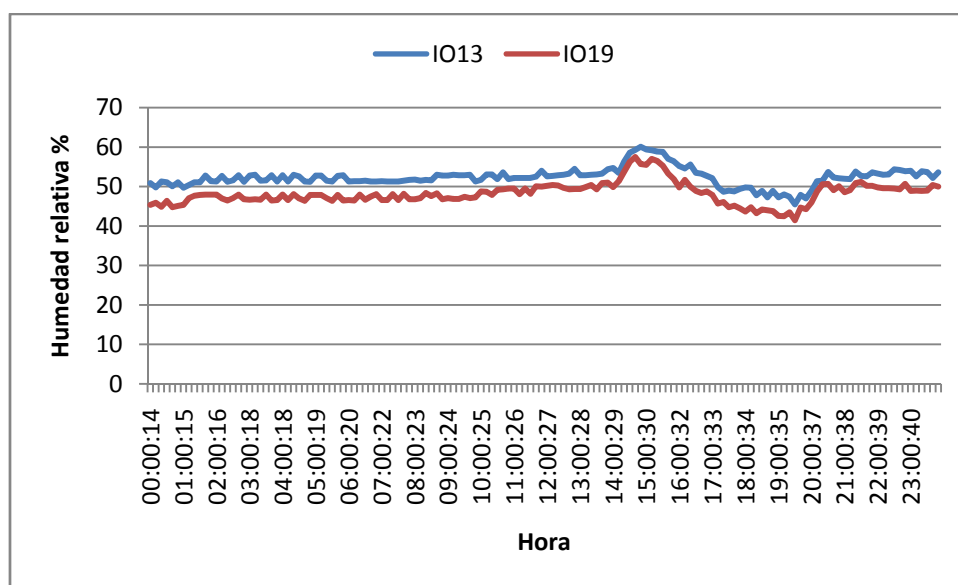


Gráfico 47: Humedad IO13 e IO19 11/8/2015 (elaboración propia)

#### 5.4.1.3. Variable posición

El sensor IO21 se corresponde con el instalado en el paramento exterior del cerramiento y se posiciona enfrenteado con el IO19 situado en la superficie interior del paramento. Se observa cómo mientras exteriormente los valores de humedad fluctúan a lo largo del día, con sus picos máximos de madrugada, en el interior de la estancia se mantienen unos niveles más o menos constantes y en torno al 50%.

Si analizamos además las lecturas del sensor IO6, ubicado en el interior del paramento, se aprecia todavía una mayor estabilidad en las mediciones.



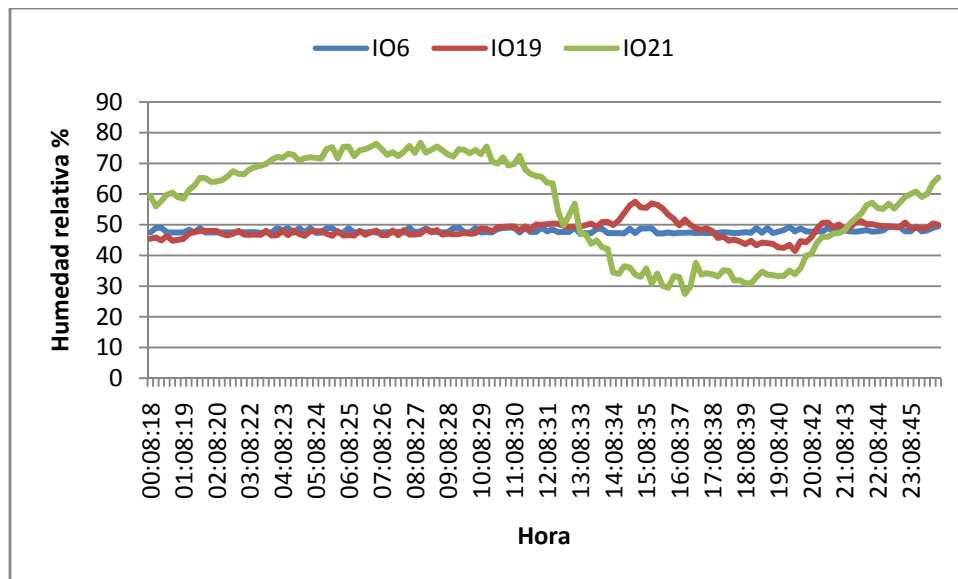


Gráfico 48: Humedad relativa IO6, IO19 e IO21 (11/8/2015) (elaboración propia)

Si ahora realizamos una comparativa entre la humedad existente en el ambiente interior de la sala con la registrada por los sensores superficiales interiores IO13 e IO19

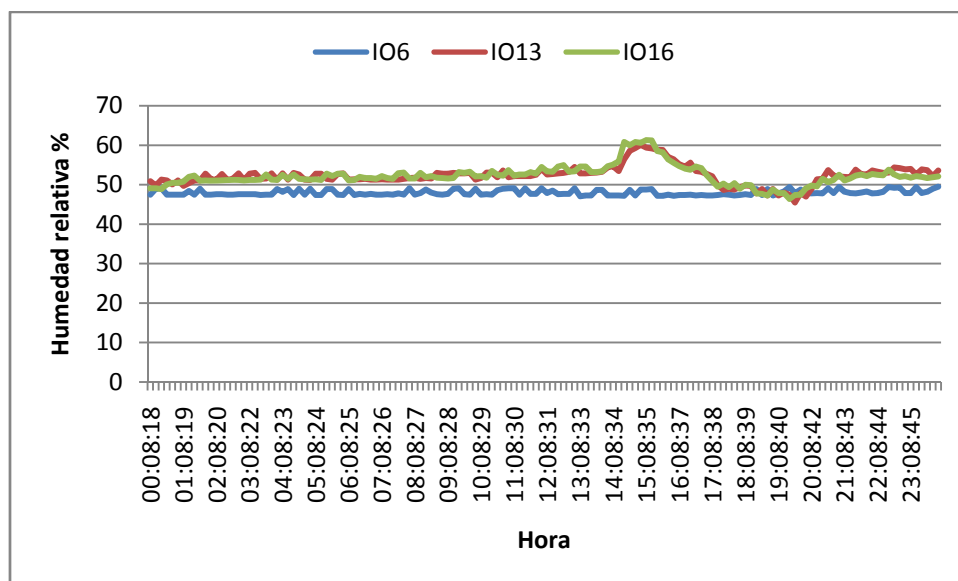
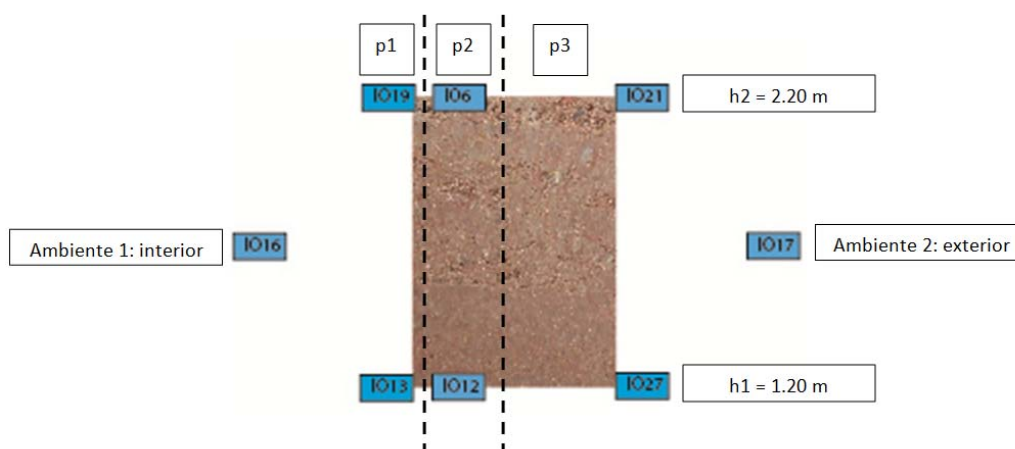


Gráfico 49: Humedad relativa IO6, IO13 e IO16 (elaboración propia)

Observaremos que según nuestra tercera hipótesis de partida para el análisis, debido a que el sensor ambiental interior IO16 registra unos valores mayores que el IO13 e IO19 significa que el cerramiento, en general, no está evaporando.

## 5.4.2. Humedad 13 Agosto de 2015

Manteniendo la misma metodología y esquema que para el caso anterior:



### 5.4.2.1. Variable ambiente:

Si analizamos los registros de los sensores IO16 e IO17 veremos que los valores tomados por el sensor IO17 presentan una mayor fluctuación a lo largo de la jornada que los registrados en el interior de la vivienda por el sensor IO16, aunque en este caso no es tan pronunciada como en el ejemplo anterior. Esto se debe al cambio sufrido por las condiciones meteorológicas durante las últimas horas. Aún así los valores registrados en el interior de la vivienda son muy inferiores a los del exterior, por lo que de la misma forma que para el caso anterior, de acuerdo con nuestra primera hipótesis, esto pone de manifiesto que no se trata de un edificio húmedo.

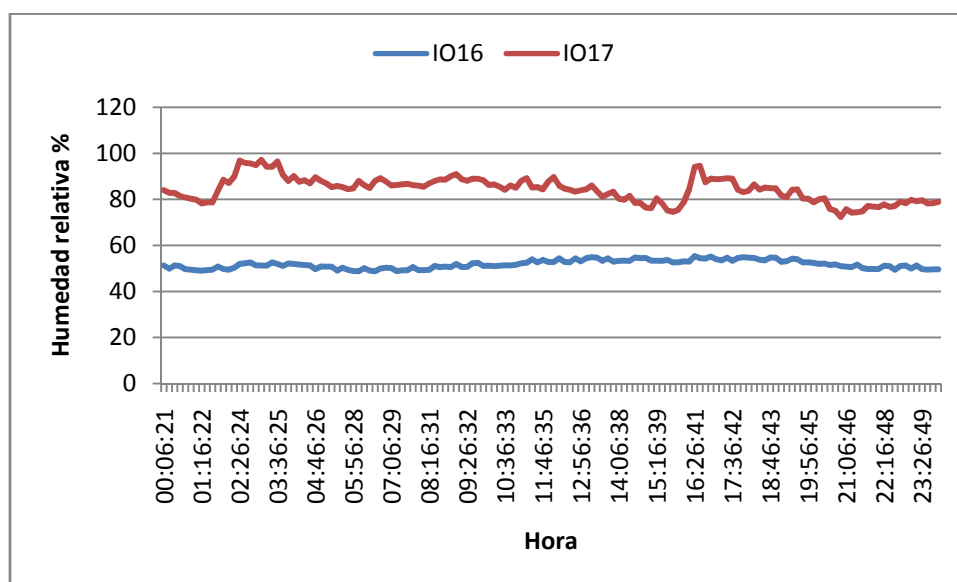


Gráfico 50: Humedad relativa IO16 e IO17 (13/8/2015) (elaboración propia)

#### 5.4.2.2. Variable altura:

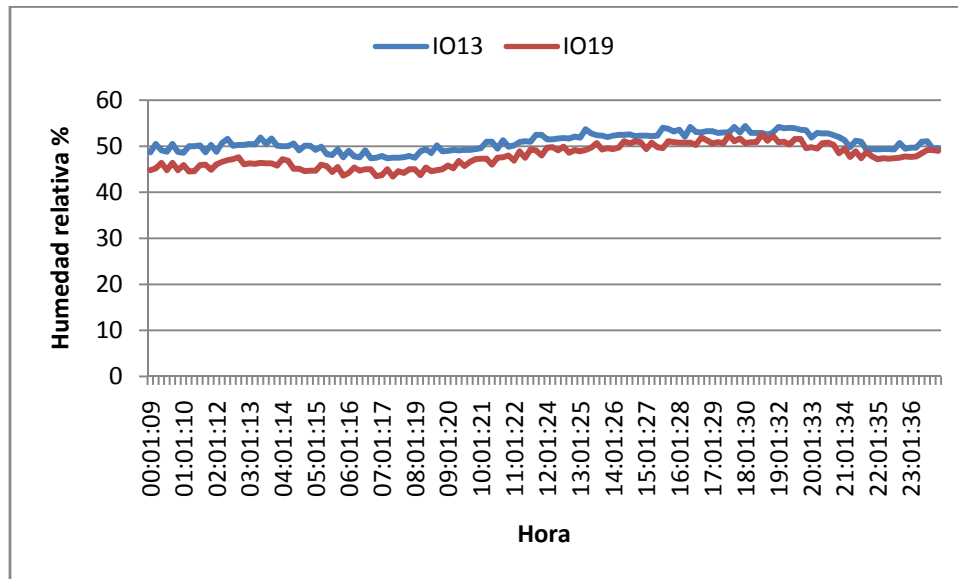


Gráfico 51: Humedad IO13 e IO19 (13/8/2015) (elaboración propia)

A la vista del gráfico adjunto, los valores de humedad registrados por el sensor IO13, situado a 1.20 m sobre el nivel del suelo muestran unos valores ligeramente superiores a los registrados por el sensor IO19 situado a 2.20 m. Esto pone de manifiesto que el sensor IO13 se encuentra más próximo a un foco de evaporación que el IO19.

#### 5.4.2.3. Variable posición:

Analizando los registros de humedad para los sensores situados en un mismo eje transversal al muro situado a 2.20 m sobre el nivel del suelo, podemos observar:

- El sensor IO21 muestra los mayores registros de humedad a lo largo de toda la jornada.
- El sensor IO6, ubicado en el interior del cerramiento a 10 cm de profundidad con respecto a la superficie interior arroja unas lecturas superiores a las del sensor IO19 situado en la superficie, hasta las 12:00 aproximadamente.
- Entre las 12:00 y las 22:00 aproximadamente, las lecturas del sensor IO19 superan a las del IO6.

Partiendo de estos datos, y según nuestras hipótesis de partida podemos afirmar que:

- Como establecimos en el análisis de la variable "ambiente" no se trata de un edificio húmedo ya que los registros del sensor IO21 superan en todo momento a los de los sensores interiores IO6 e IO19.
- Hasta las 12:00 de la mañana, los registros de humedad relativa del sensor interior al cerramiento son superiores a los del sensor IO19. Esto, según nuestra tercera hipótesis nos indica que hasta las 12:00 el flujo de humedad del muro fluye hacia el interior, es decir, el muro evapora hacia el interior de la estancia.

- Entre las 12:00 y las 22:00, el flujo de humedad del muro se invierte, por lo que el cerramiento deja de evaporar hacia el interior de la estancia.

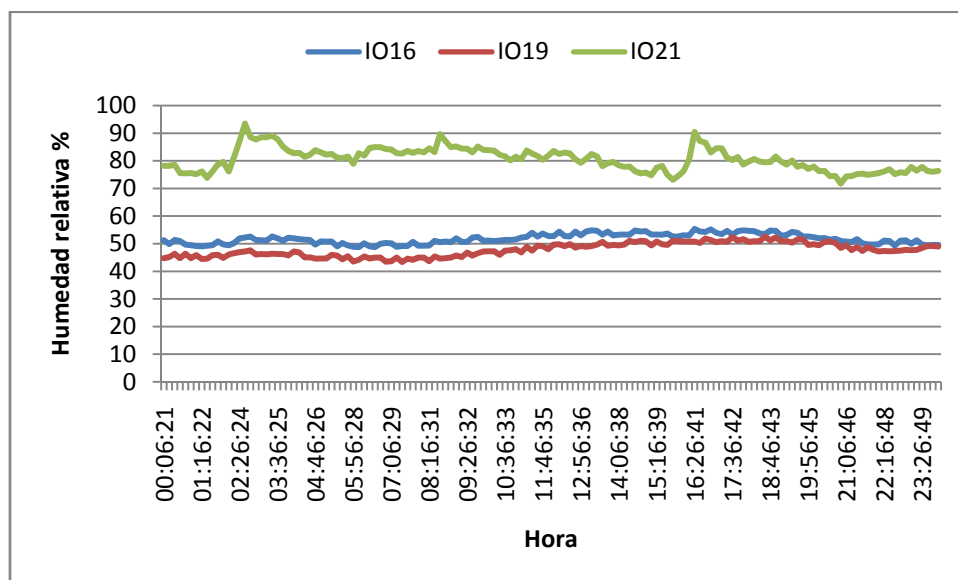


Gráfico 52: Humedad relativa IO6, IO19 e IO21 (13/8/2015) (elaboración propia)

Si ahora realizamos una comparativa entre la humedad existente en el ambiente interior de la sala con la registrada por los sensores superficiales interiores IO13 e IO19.

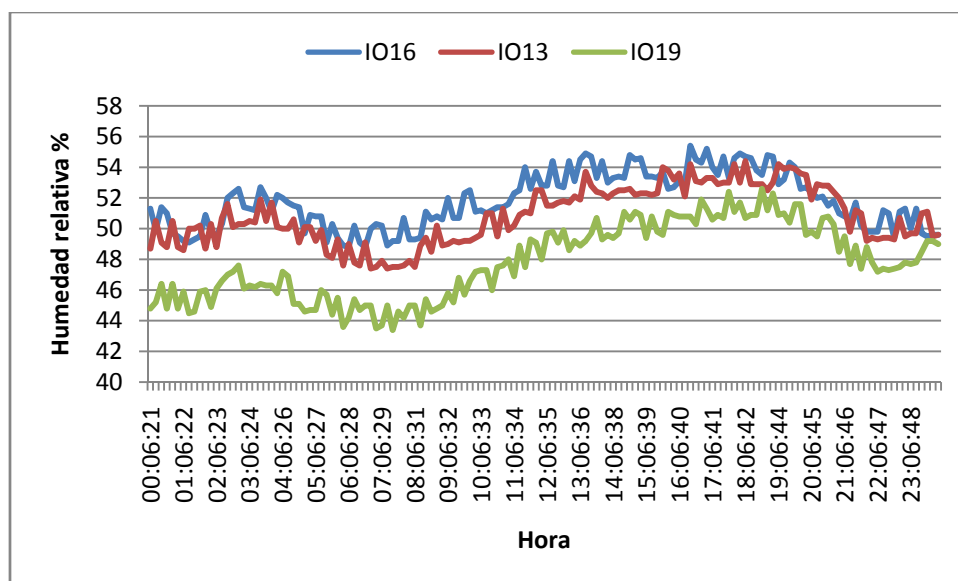


Gráfico 53: Humedad relativa IO6, IO13 e IO19 (13/8/2015) (elaboración propia)

Al contrario de lo que sucedía en las lecturas del 11 de agosto, a excepción de unas tres horas al principio de la jornada, las lecturas de los sensores IO13 e IO19 superan a las del sensor IO6. Según nuestra tercera hipótesis de partida, esto nos lleva a afirmar que, a lo largo de la jornada del 13 de agosto, el cerramiento está evaporando hacia el interior de la sala.

### **5.4.3. Conclusiones análisis humedad.**

Tras analizar las gráficas obtenidas a partir de los registros de los sensores instalados se puede concluir:

Que no se trata en ningún caso de una vivienda húmeda. Tras considerar y analizar los registros de los sensores IO13 e IO19, se puede considerar la existencia de un foco de evaporación, posiblemente el suelo. Para el 11 de agosto, debido a que los valores del sensor IO6 (ambiente interior) están por encima de los registrados por los sensores IO13 Y IO19 (superficie interior), el cerramiento en ningún momento evapora hacia el interior de la estancia. El 13 de agosto, a excepción de unas tres horas al principio de la jornada, las lecturas de los sensores IO13 e IO19 sobrepasan a las del sensor IO6. Esto nos lleva a afirmar que, a lo largo de esta jornada, el cerramiento está evaporando hacia el interior de la sala.

## CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES

La realización del presente trabajo por su componente teórico-práctica ha permitido desarrollar técnicas y experimentar el uso de diversas tecnologías desconocidas por la alumna.

Durante la investigación y las diversas pruebas, se ha podido comprobar algunas de las funcionalidades de Raspberry Pi ya que como se pretendía, se ha conseguido crear un sistema de monitorización en tiempo real de sensores el cual tras la realización de diversas pruebas y correcciones, se ha podido comprobar su correcto funcionamiento en un edificio real.

Se ha conseguido ofrecer una solución de monitorización mediante sensores de un elemento constructivo y de bajo coste.

Se habían marcado cinco objetivos muy claros, ligados al diseño e implementación del sistema. Los objetivos primero y segundo están relacionados. Ha consistido en conectar un conjunto de sensores al Raspberry Pi 2, además de la instalación de los mismos sobre un elemento constructivo existente e "in situ". El tercer objetivo se centraban en el registro de dos magnitudes físicas, temperatura y humedad. Por último, el procesamiento de los datos, obtención de gráficos y análisis de los mismos.

En cuanto al análisis de los resultados obtenidos mediante la monitorización con sensores del muro de tapia se puede concluir:

Los muros de tierra presentan una pobre resistencia térmica en estado estacionario, aunque esta se ve linealmente incrementada con el espesor de los mismos.

La capacidad calorífica que poseen los muros de tierra es la responsable del retraso de la conducción de calor a través del muro, contribuyendo así a alcanzar unas temperaturas más suaves en el interior de las viviendas.

El flujo térmico exterior está altamente influenciado por la radiación solar.

Los resultados experimentales muestran la existencia de un considerable retraso entre los valores máximos de las temperaturas internas y externas, debido a la elevada inercia térmica del elemento.

El aislamiento capacitivo tiene un efecto amortiguador y estabilizador, permitiendo el cumplir los estándares de confort interior para la época del año.

Los resultados demuestran que es necesario mejorar la conductividad térmica de la tierra para alcanzar los requerimientos mínimos impuestos por la normativa de edificación.

Durante la campaña de verano, el comportamiento térmico de las construcciones de tierra es muy satisfactorio.

A pesar de que existen ciertos aspectos de la metodología susceptibles de mejora se puede concluir que se ha realizado un trabajo acorde a las expectativas iniciales, que funciona y que además pone las bases para la elaboración de un sistema más complejo en un futuro.



## CAPÍTULO 7: FUTUROS DESARROLLOS.

Como futuras mejoras en cuanto a la metodología desarrollada se plantean:

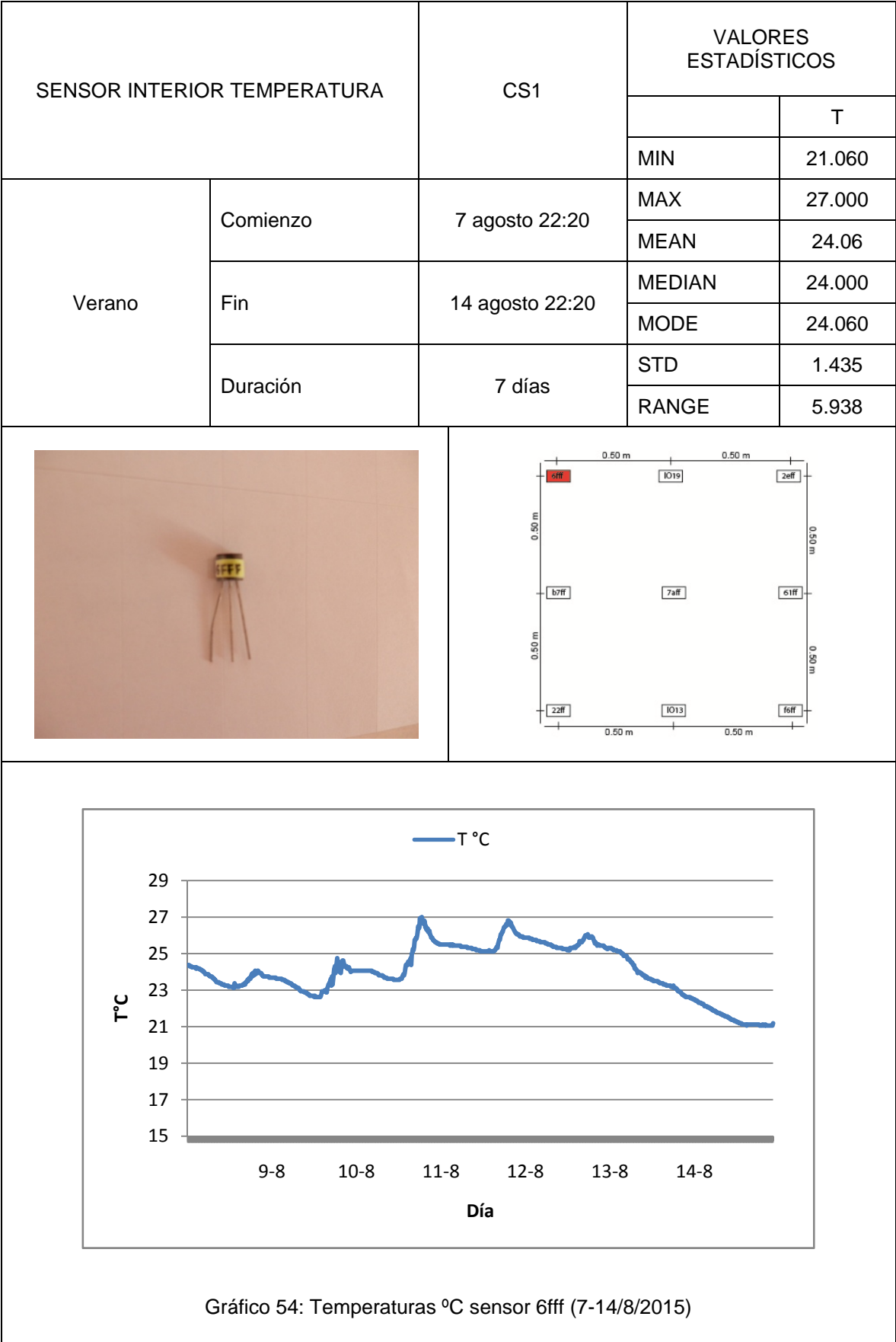
- A. La creación de una base de datos se recoja los datos registrados por los diferentes sensores instalados.
- B. Acceso remoto a los registros.
- C. Visualización vía web de los datos registrados mediante gráficos dinámicos..
- D. La instalación de un pirómetro sobre el elemento constructivo monitorizado que permita el registro de la radiación solar incidente en el propio elemento.
- E. La instalación de un flujómetro en la superficie del cerramiento que nos permita valorar las secuencias de variación del flujo térmico en el interior del muro a lo largo del período monitorizado
- F. También se plantea la instalación de algún otro sensor, como por ejemplo de viento y/o precipitación, que nos permita obtener un beneficio en la calidad de la monitorización.





PRESUPUESTO	
Artículo	Presio (€)
Cable datal YCY 4*0.22 mm	50.34
Raspberry Pi cobbler breakout	8.51
Jumpers conexión protoboard machos (68 unidades)	4.53
Placa protoboar 150*50 mm	12.00
Cargador alimentador micro USB 5 V 2.1A	16.06
Tenaza pelacables	8.70
Cable HDMI 1.4 macho a macho 2.00 m	6.62
Estaño normal 1 mm 100 gr	4.53
Soldador eléctrico 40 W	10.62
Tarjeta micro SD 16 GB class 4 con adaptador SD	11.01
Resistencia carbón 1/4 W 5% PR-25	0.24
9 Sensores temperatura humedad dht22 arduino electronica prototipo dht-22 am2302	70.80
13 ds18b20 sensor temperatura dallas arduino + resistencia 4.7kohm	23.40
Raspberry pi 2 - modelo b 1gb + kit 2 disipadores - quad core j	47.79
3 Sonda temperatura ds18b20 sensor sumergible arduino desde españa electronica	8.70
TOTAL	283.84

ANEXOS



SENSOR INTERIOR TEMPERATURA Y HUMEDAD		CS1	VALORES ESTAD. TEMPERATURA		
				T	HR
			MIN	21.200	25.400
Verano	Comienzo	7 agosto 22:20	MAX	27.000	57.500
			MEAN	24.330	44.200
	Fin	14 agosto 22:20	MEDIAN	24.300	45.600
			MODE	21.300	46.600
	Duración	7 días	STD	1.444	5.364
			RANGE	5.800	32.100

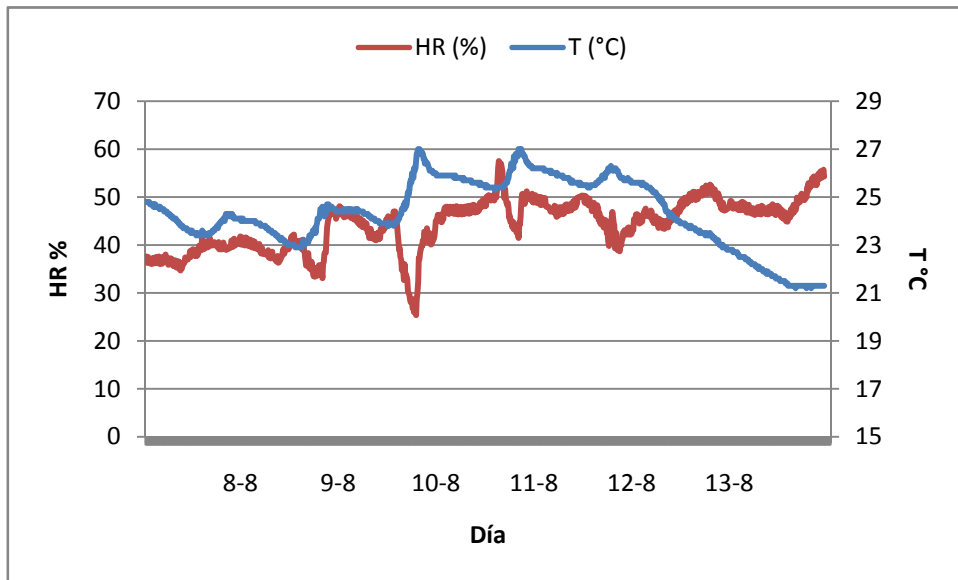
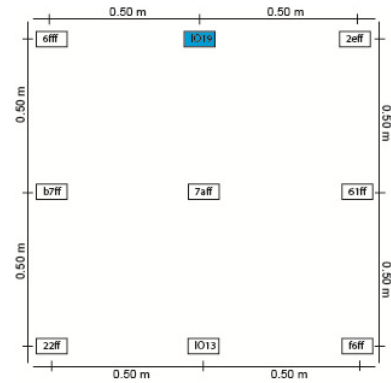
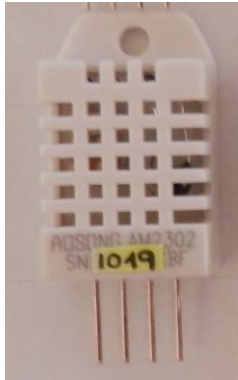


Gráfico 55: Temperaturas °C y humedad relativa % sensor IO19 (7-14/8/2015)

SENSOR INTERIOR TEMPERATURA		CS1	VALORES ESTADÍSTICOS	
				T
			MIN	20.940
Verano	Comienzo	7 agosto 22:20	MAX	26.440
			MEAN	24.110
	Fin	14 agosto 22:20	MEDIAN	24.060
			MODE	25.630
	Duración	7 días	STD	1.428
			RANGE	5.500

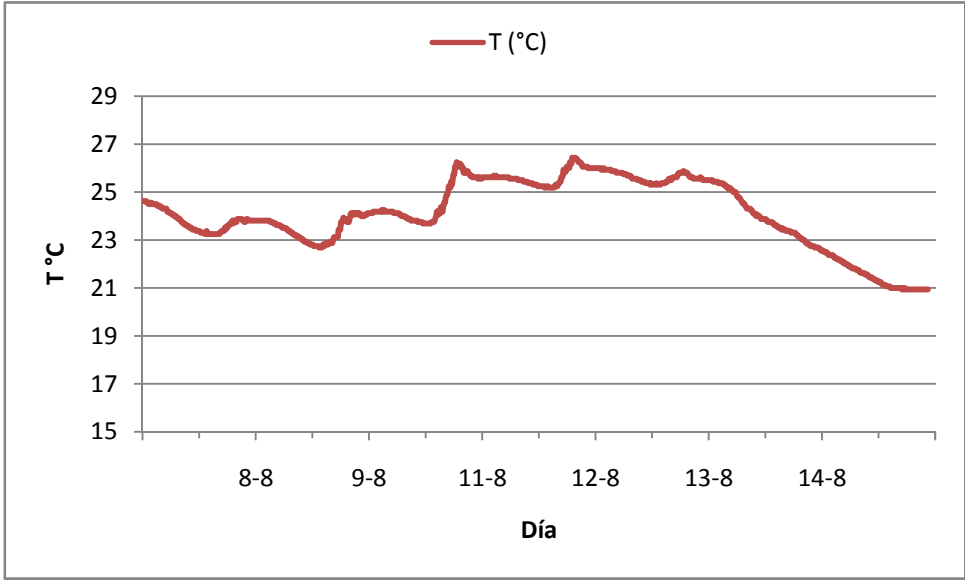
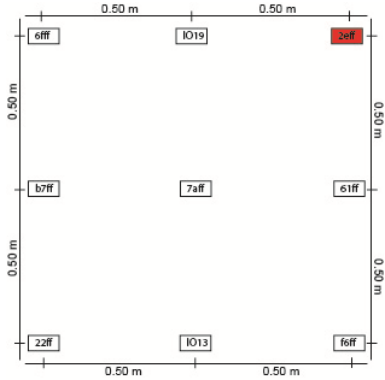
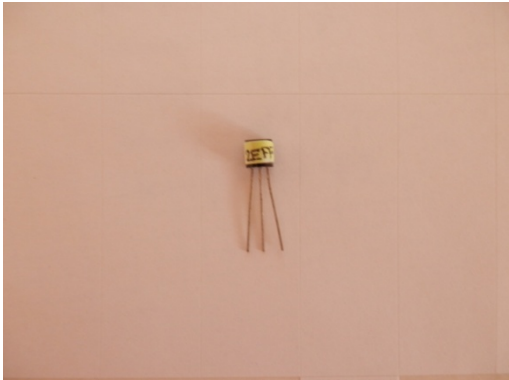
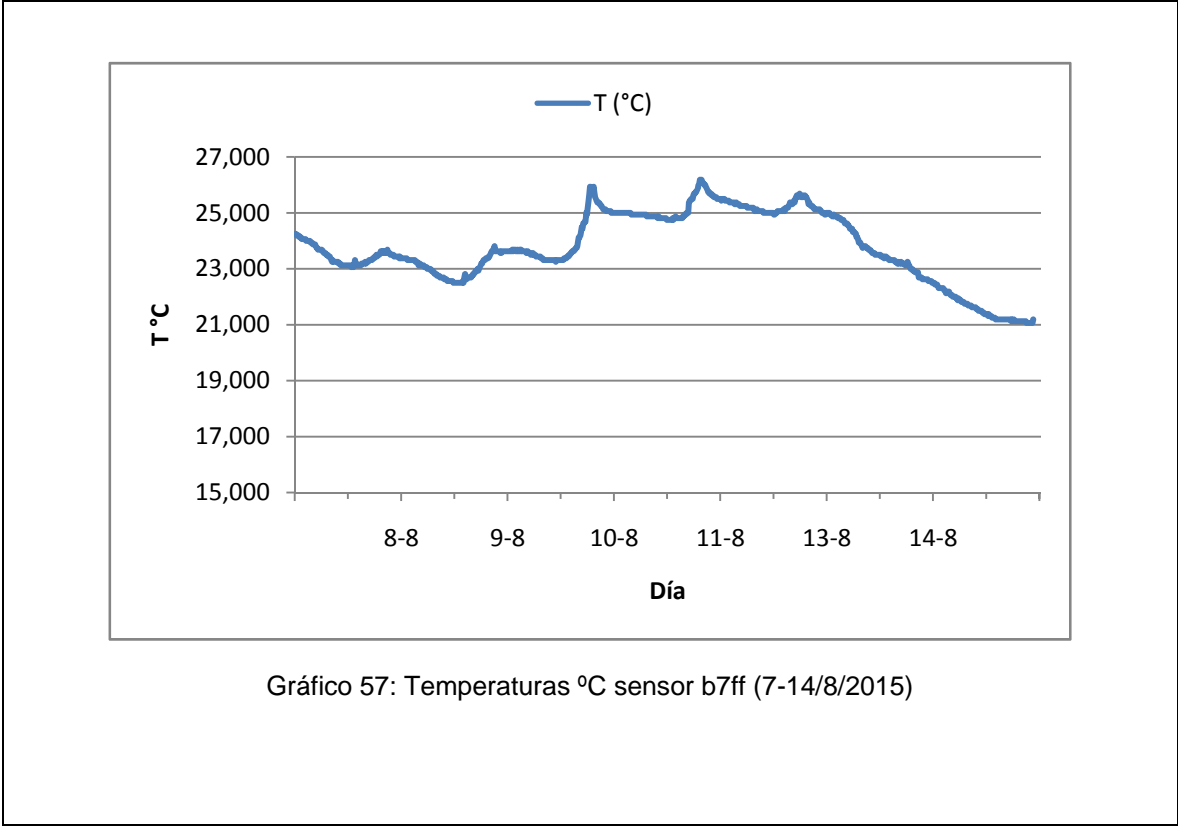
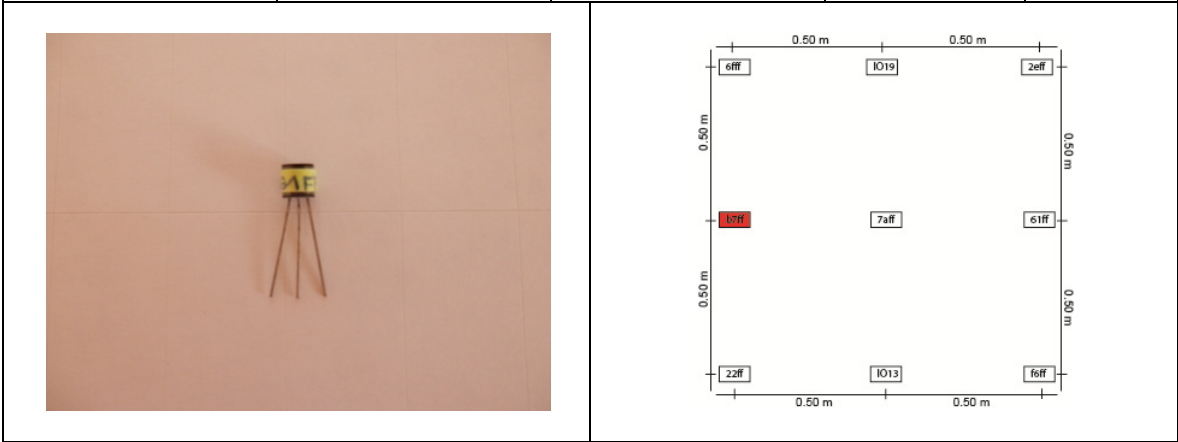


Gráfico 56: Temperaturas °C sensor 2eff (7-14/8/2015)

SENSOR INTERIOR TEMPERATURA		CS1	VALORES ESTADÍSTICOS	
				T
			MIN	21.060
Verano	Comienzo	7 agosto 22:20	MAX	26.190
			MEAN	23.760
	Fin	14 agosto 22:20	MEDIAN	23.630
			MODE	23.310
	Duración	7 días	STD	1.266
			RANGE	5.125



SENSOR INTERIOR TEMPERATURA		CS1	VALORES ESTADÍSTICOS	
			MIN	21.060
Verano	Comienzo	7 agosto 22:20	MAX	26.130
			MEAN	23.8901
	Fin	14 agosto 22:20	MEDIAN	23.750
			MODE	25.190
	Duración	7 días	STD	1.273
			RANGE	5.063

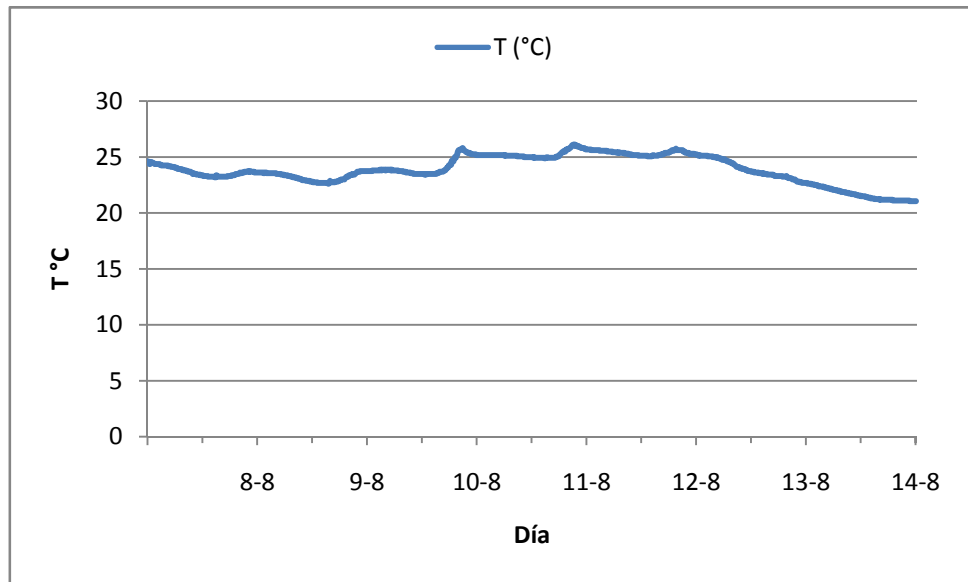
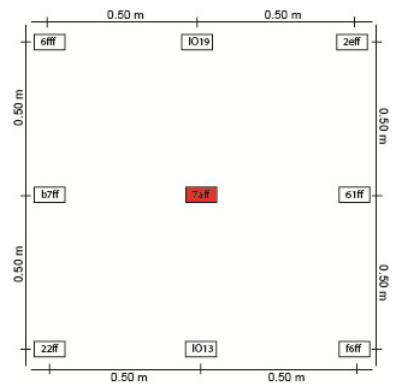
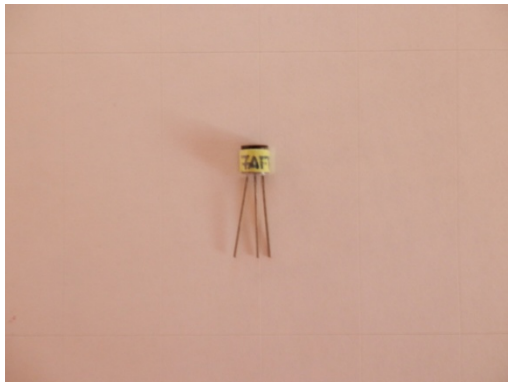


Gráfico 58: Temperaturas °C sensor 7aff (7-14/8/2015)

SENSOR INTERIOR TEMPERATURA		CS1	VALORES ESTADÍSTICOS	
			MIN	21.380
Verano	Comienzo	7 agosto 22:20	MAX	26.310
			MEAN	24.110
	Fin	14 agosto 22:20	MEDIAN	23.940
			MODE	25.310
	Duración	7 días	STD	1.243
			RANGE	4.937

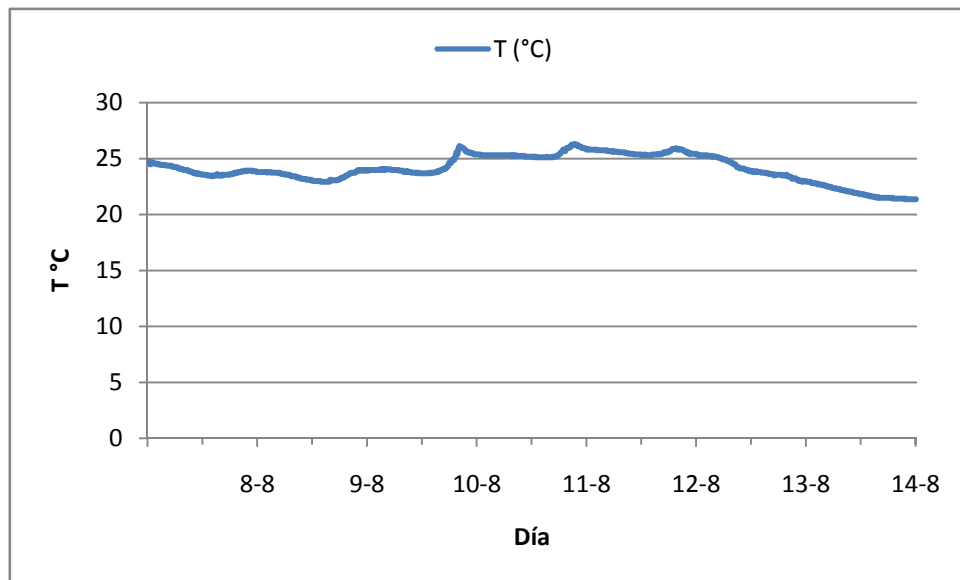
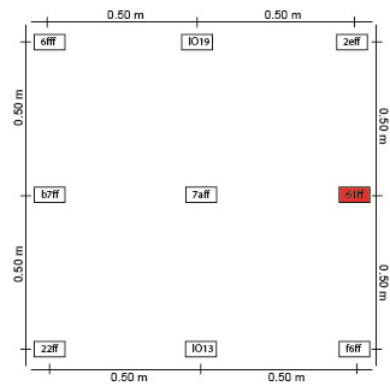
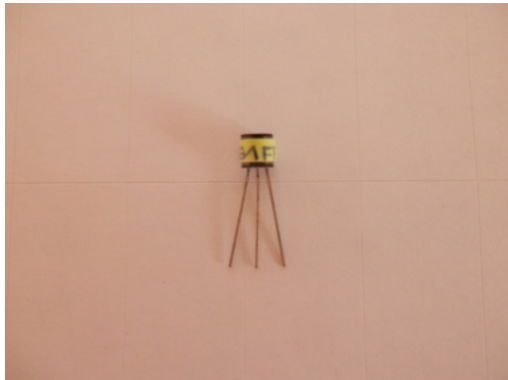


Gráfico 59: Temperaturas °C sensor 61ff (7-14/8/2015)



SENSOR INTERIOR TEMPERATURA		CS1	VALORES ESTADÍSTICOS	
				T
			MIN	20.810
Verano	Comienzo	7 agosto 22:20	MAX	25.380
			MEAN	23.280
	Fin	14 agosto 22:20	MEDIAN	23.000
			MODE	24.310
	Duración	7 días	STD	1.180
			RANGE	4.563

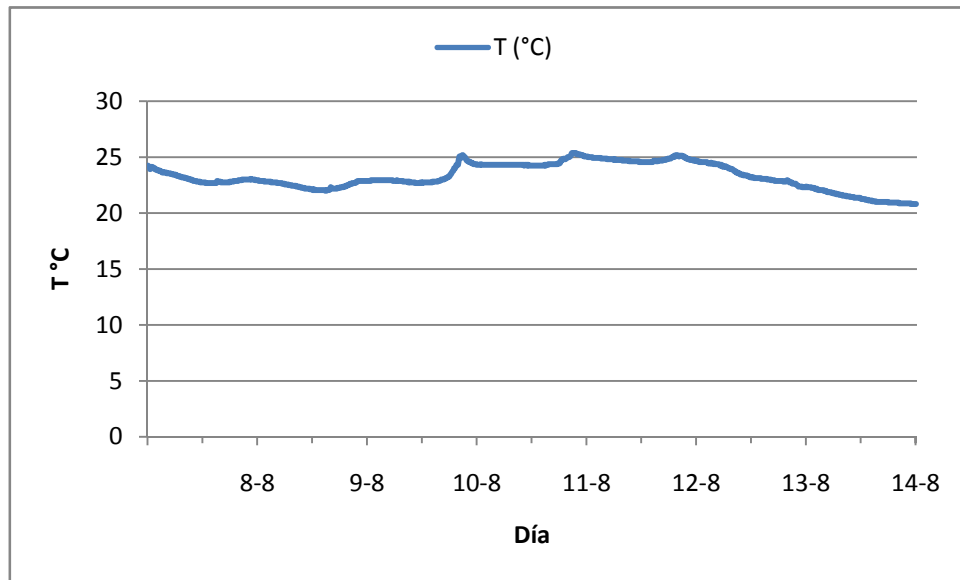
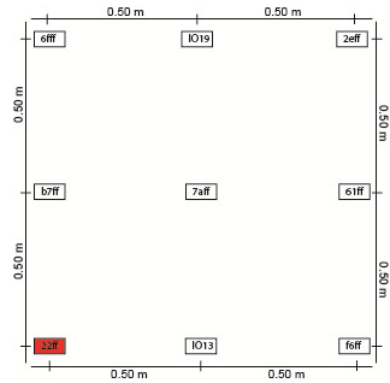
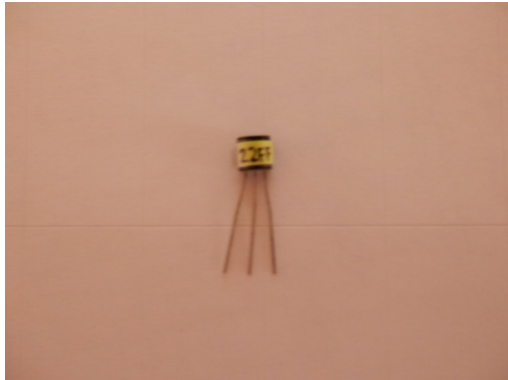


Gráfico 60: Gráfico 59: Temperaturas °C sensor 221ff (7-14/8/2015)

SENSOR INTERIOR TEMPERATURA Y HUMEDAD		CS1	VALORES ESTADÍSTICOS		
				T	HR
			MIN	21.100	26.100
Verano	Comienzo	7 agosto 22:20	MAX	26.400	60.100
			MEAN	23.500	47.140
	Fin	14 agosto 22:20	MEDIAN	23.300	48.300
			MODE	23.000	51.300
	Duración	7 días	STD	1.219	5.206
			RANGE	5.300	34.000

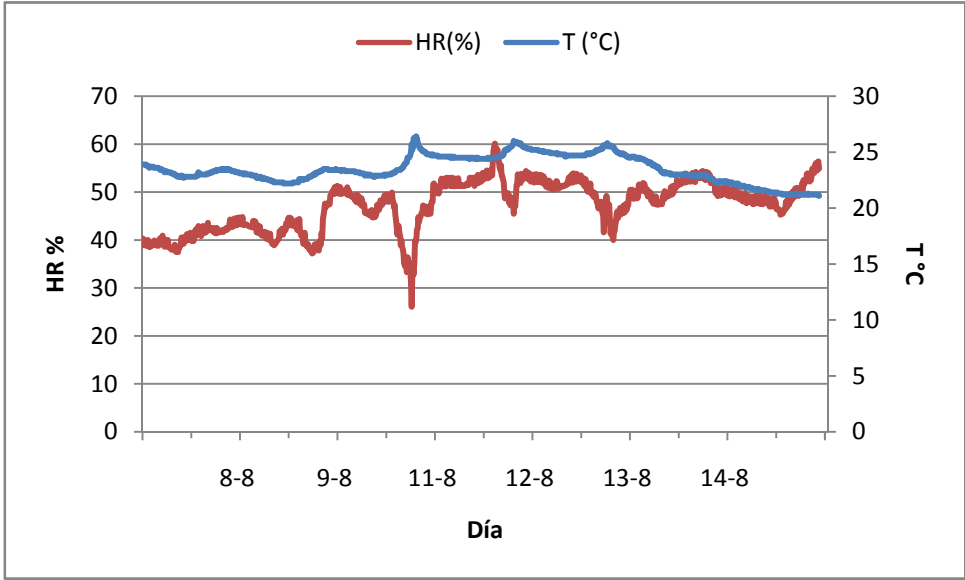
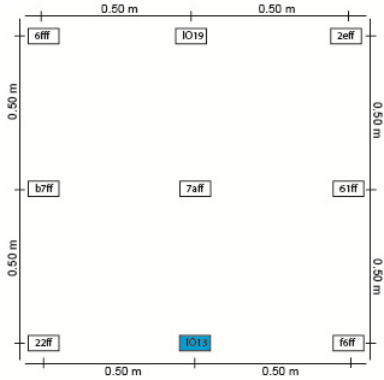
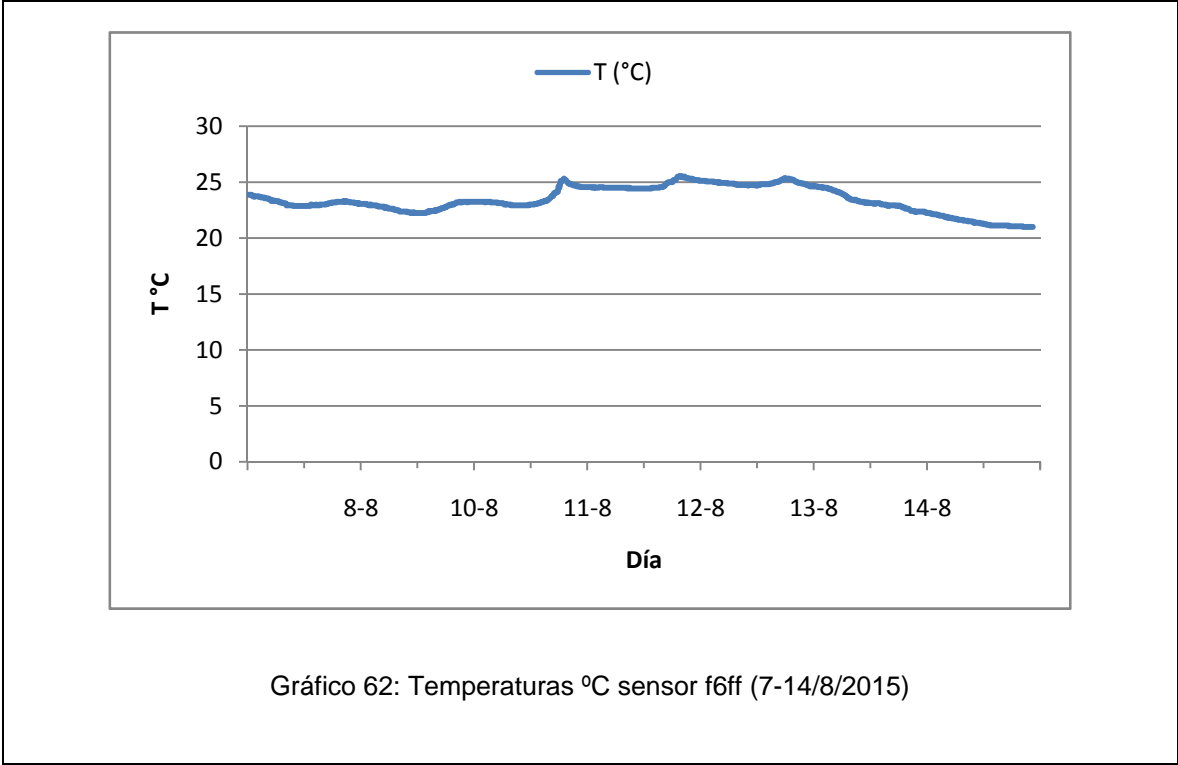
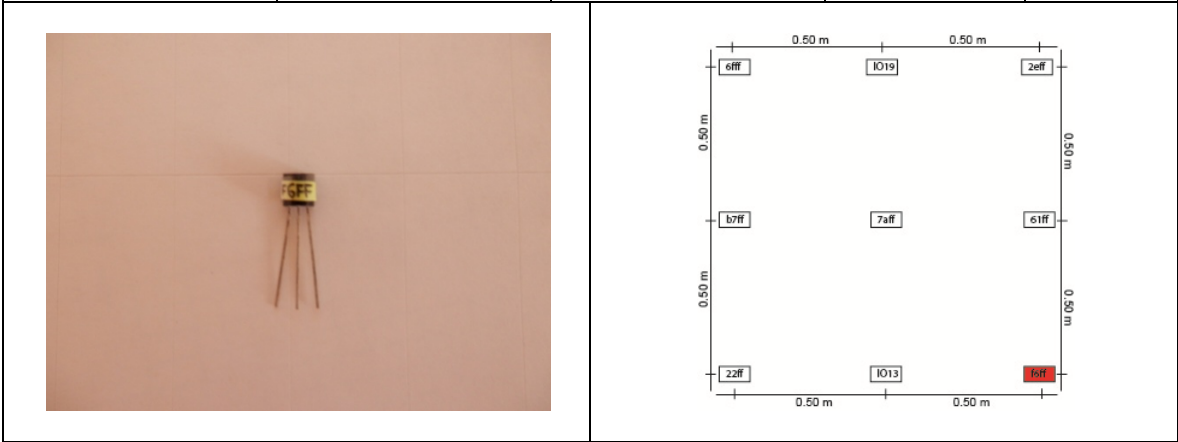


Gráfico 61: Temperaturas °C y humedad relativa % sensor IO13 (7-14/8/2015)

SENSOR INTERIOR TEMPERATURA		CS1	VALORES ESTADÍSTICOS	
				T
			MIN	21.000
Verano	Comienzo	7 agosto 22:20	MAX	25.560
			MEAN	23.444
	Fin	14 agosto 22:20	MEDIAN	23.250
			MODE	22.940
	Duración	7 días	STD	1.184
			RANGE	34.562



SENSOR EXTERIOR TEMPERATURA		CS1	VALORES ESTADÍSTICOS	
				T
			MIN	11.437
Verano	Comienzo	7 agosto 22:20	MAX	45.500
			MEAN	23.094
	Fin	14 agosto 22:20	MEDIAN	20.750
			MODE	20.375
	Duración	7 días	STD	7.344
			RANGE	34.063

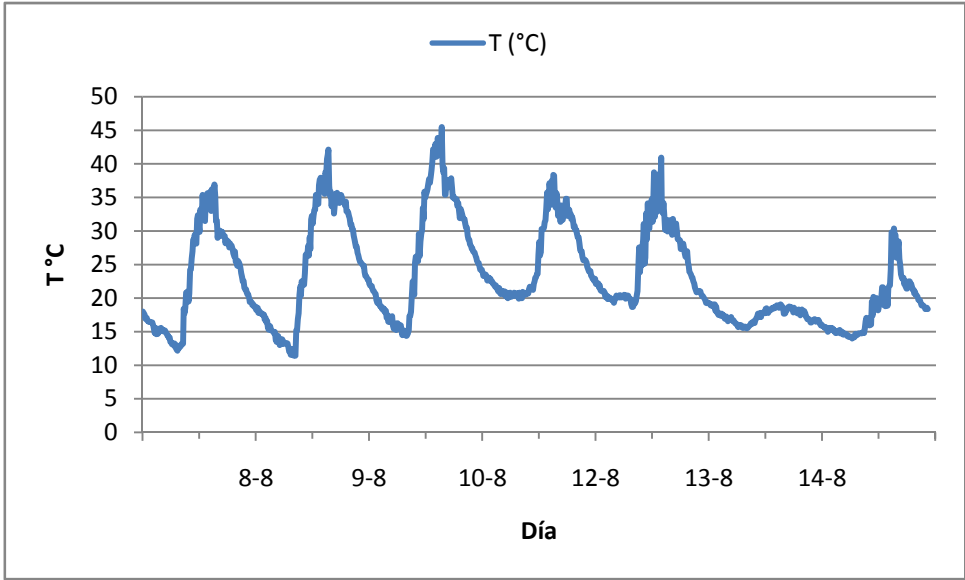
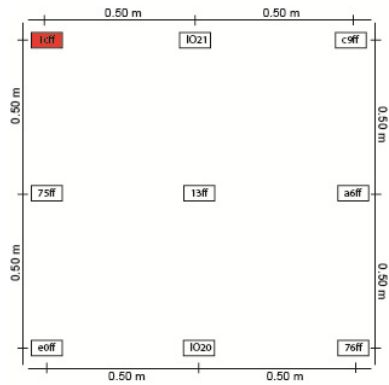
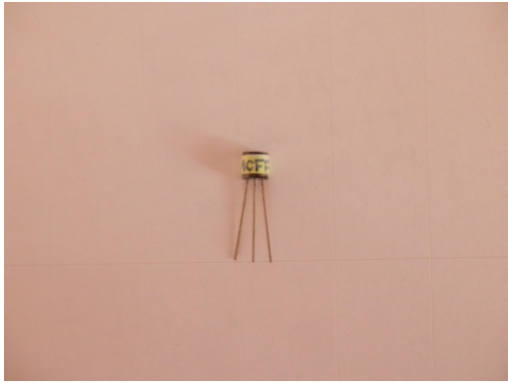


Gráfico 63: Temperaturas °C sensor 1cff (7-14/8/2015)

SENSOR EXTERIOR TEMPERATURA Y HUMEDAD		CS1	VALORES ESTAD. TEMPERATURA		
				T	HR
			MIN	10.700	11.900
Verano	Comienzo	7 agosto 22:20	MAX	43.100	93.500
			MEAN	22.410	57.470
	Fin	14 agosto 22:20	MEDIAN	20.200	61.800
			MODE	18.500	77.800
	Duración	7 días	STD	7.088	20.390
			RANGE	32.400	81.600

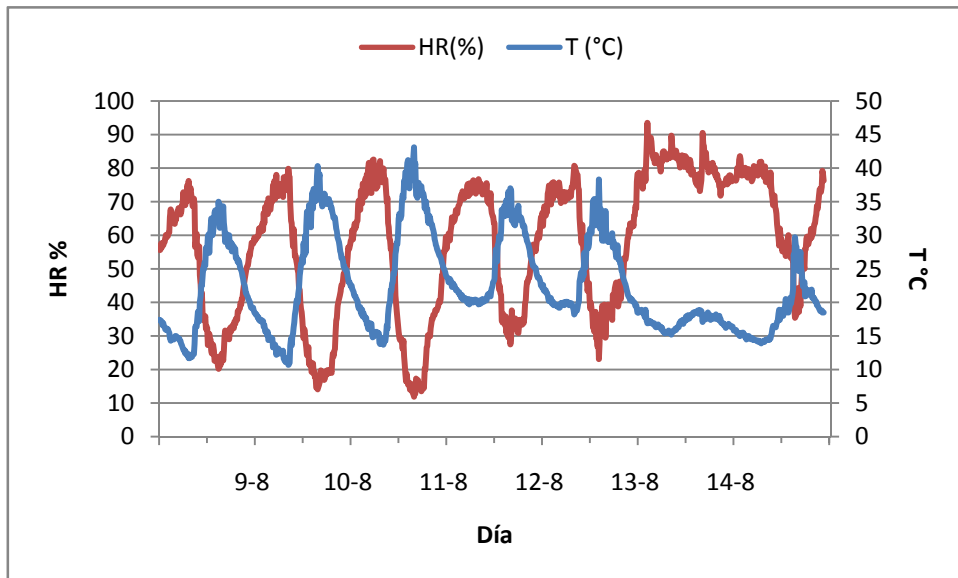
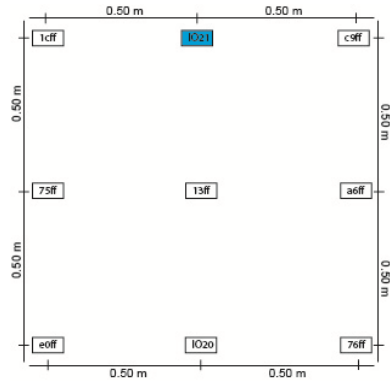
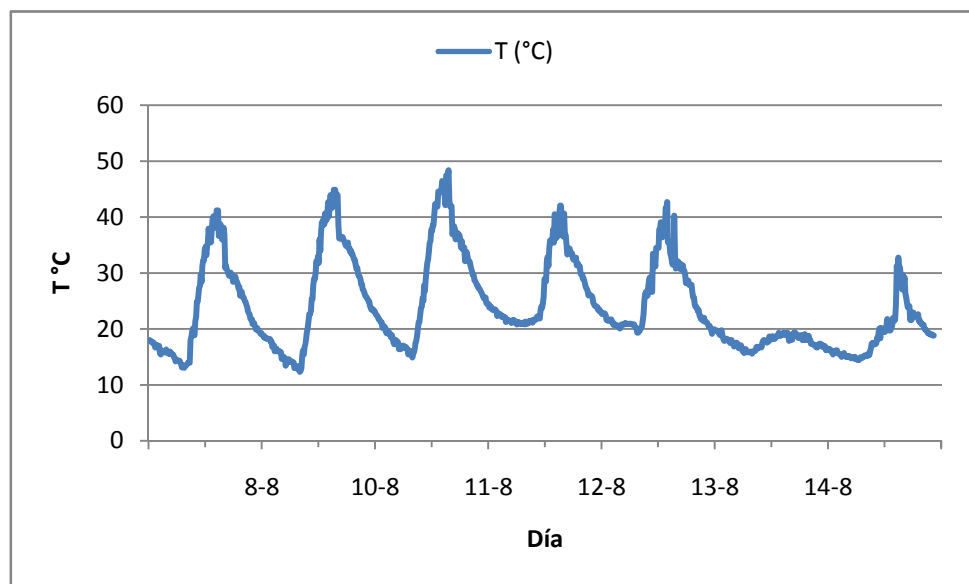
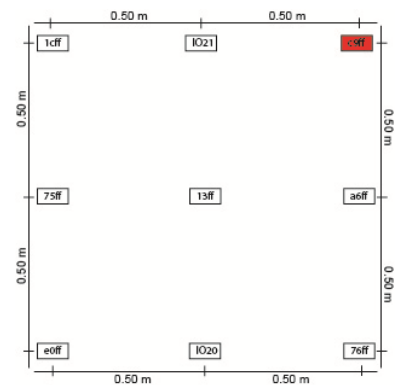
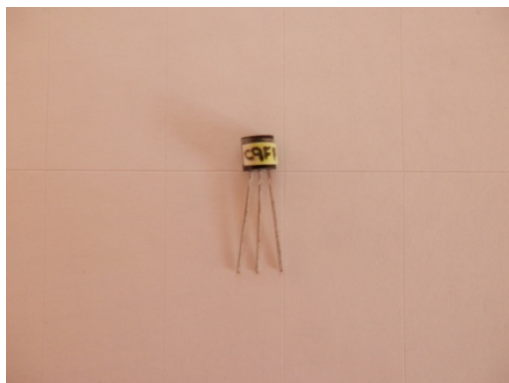
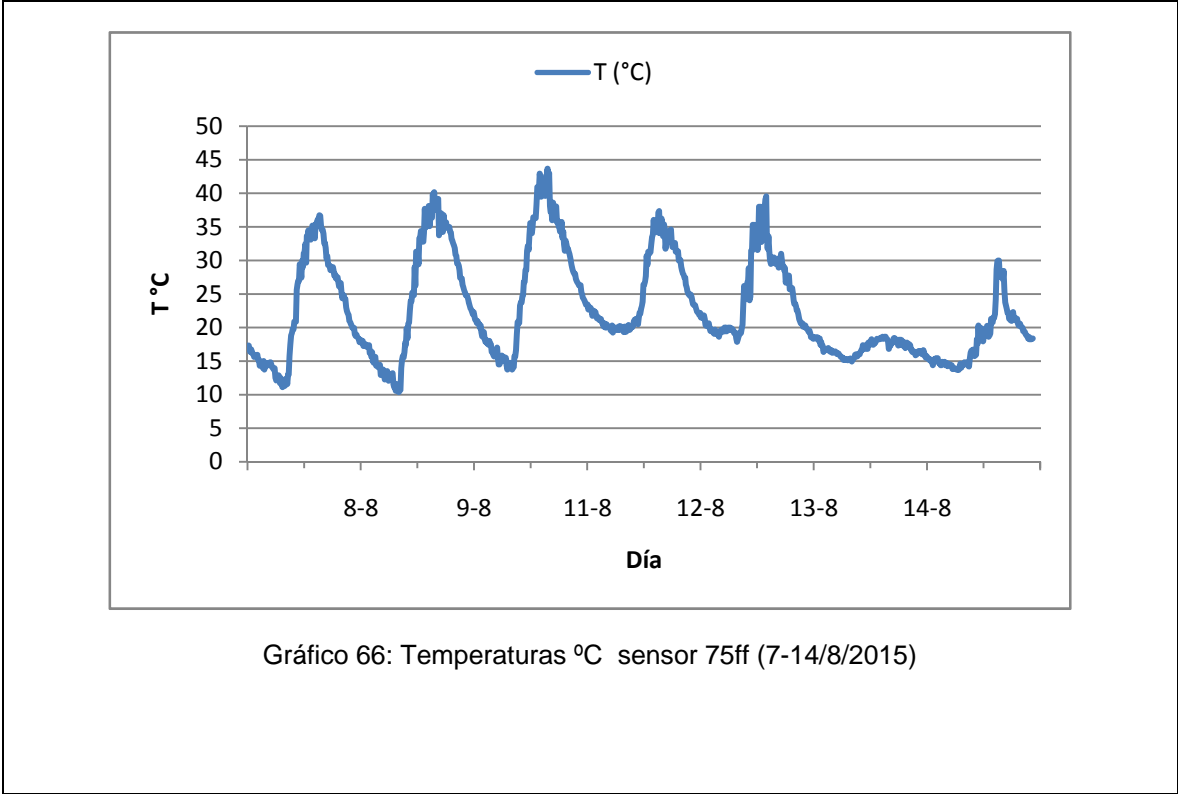
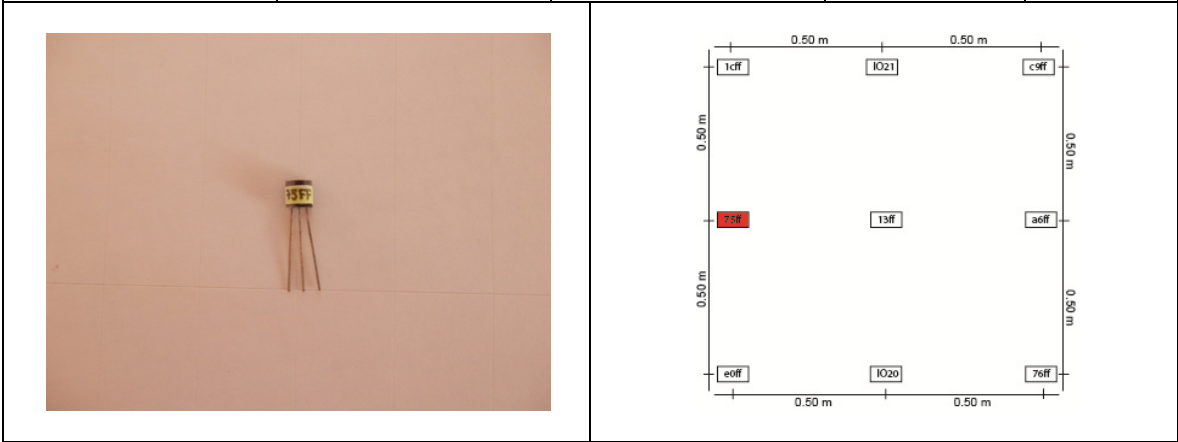


Gráfico 64: Temperaturas °C y humedad relativa % sensor IO21 (7-14/8/2015)

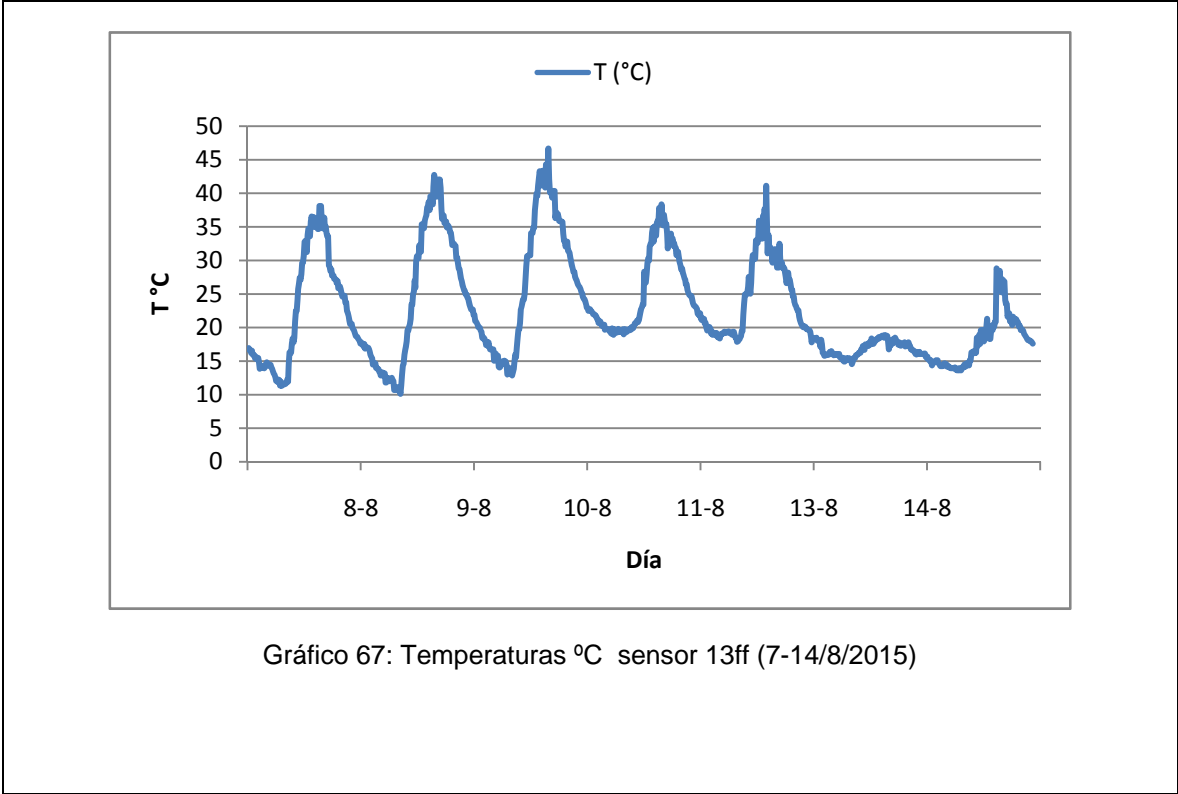
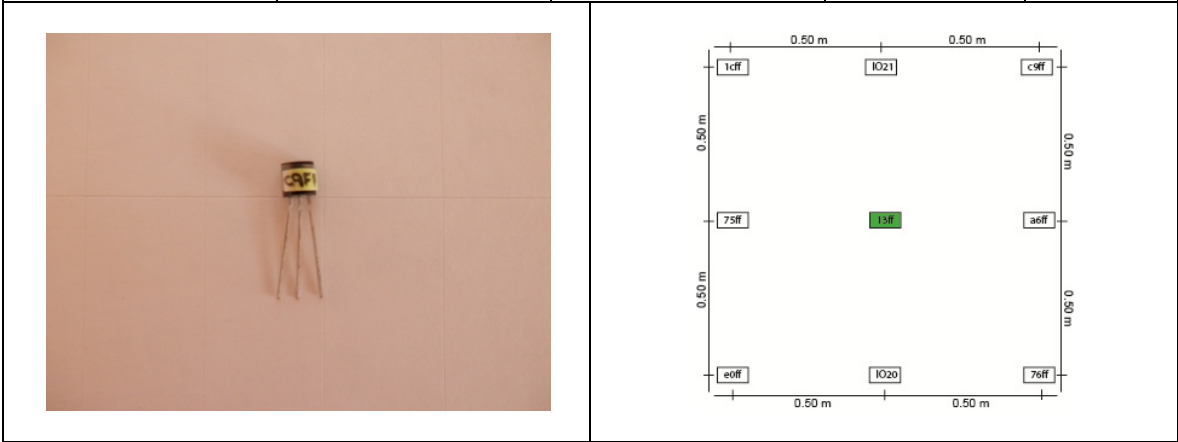
SENSOR EXTERIOR TEMPERATURA		CS1	VALORES ESTADÍSTICOS	
				T
			MIN	12.310
Verano	Comienzo	7 agosto 22:20	MAX	48.380
			MEAN	23.950
	Fin	14 agosto 22:20	MEDIAN	21.210
			MODE	21.630
	Duración	7 días	STD	8.055
			RANGE	36.060



SENSOR EXTERIOR TEMPERATURA		CS1	VALORES ESTADÍSTICOS	
				T
			MIN	10.380
Verano	Comienzo	7 agosto 22:20	MAX	43.690
			MEAN	22.650
	Fin	14 agosto 22:20	MEDIAN	20.130
			MODE	14.380
	Duración	7 días	STD	7.553
			RANGE	33.310

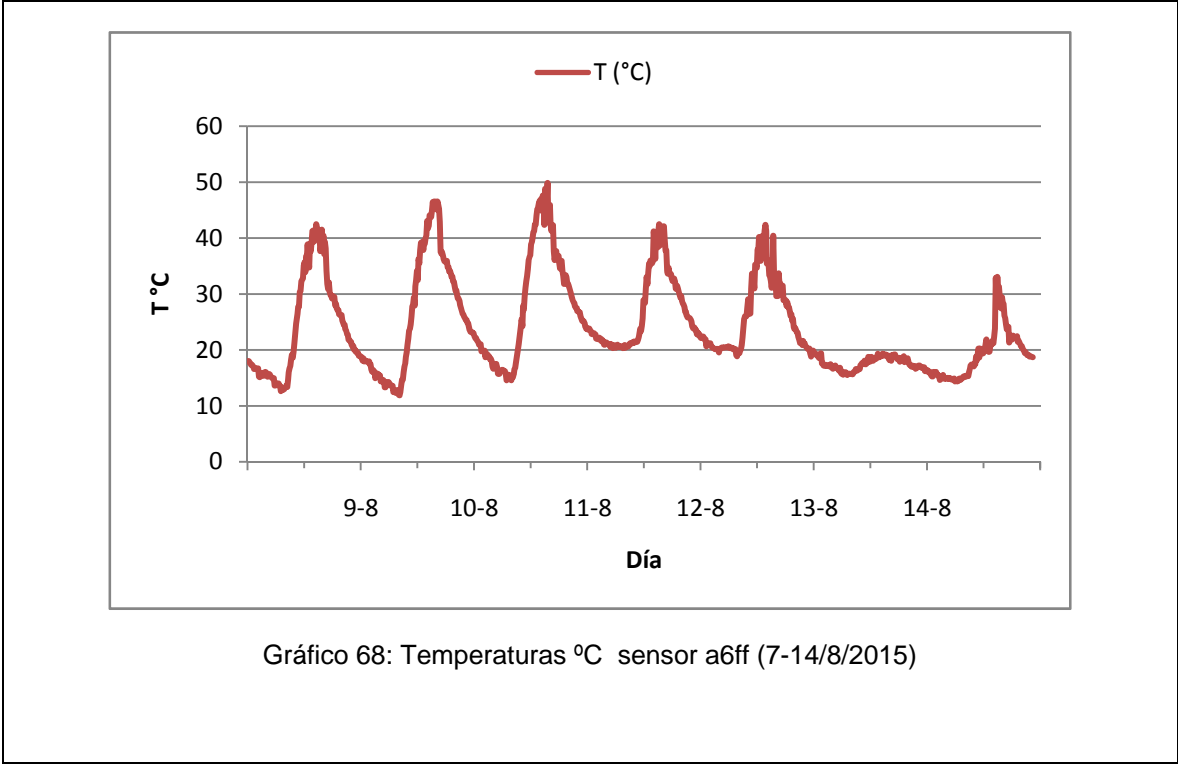
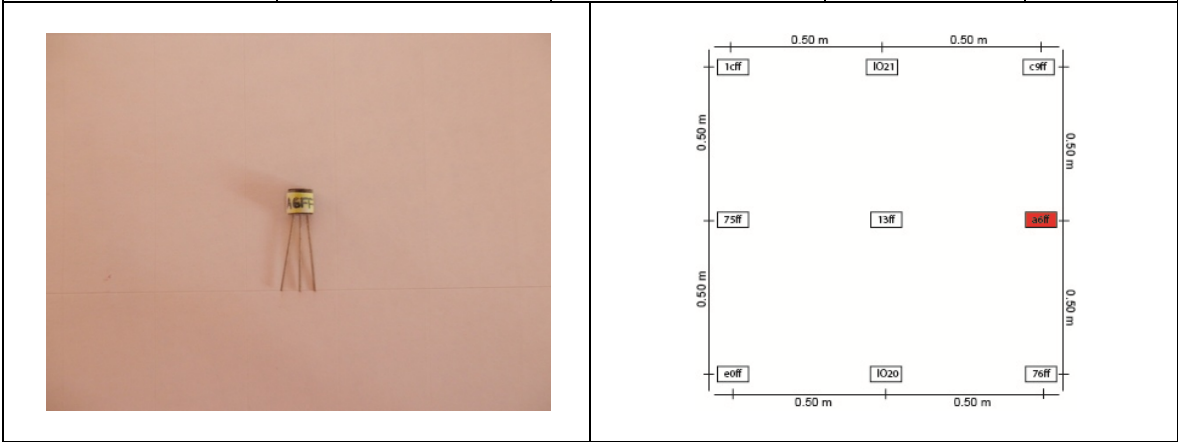


SENSOR EXTERIOR TEMPERATURA		CS1	VALORES ESTADÍSTICOS	
				T
			MIN	10.130
Verano	Comienzo	7 agosto 22:20	MAX	46.690
			MEAN	22.540
	Fin	14 agosto 22:20	MEDIAN	19.750
			MODE	18.500
	Duración	7 días	STD	7.879
			RANGE	36.560





SENSOR EXTERIOR TEMPERATURA		CS1	VALORES ESTADÍSTICOS	
				T
			MIN	11.880
Verano	Comienzo	7 agosto 22:20	MAX	49.880
			MEAN	23.950
	Fin	14 agosto 22:20	MEDIAN	20.940
			MODE	17.190
	Duración	7 días	STD	8.532
			RANGE	38.000



SENSOR EXTERIOR TEMPERATURA		CS1	VALORES ESTADÍSTICOS	
				T
			MIN	11.750
Verano	Comienzo	7 agosto 22:20	MAX	49.130
			MEAN	24.410
	Fin	14 agosto 22:20	MEDIAN	20.940
			MODE	18.940
	Duración	7 días	STD	8.669
			RANGE	37.380

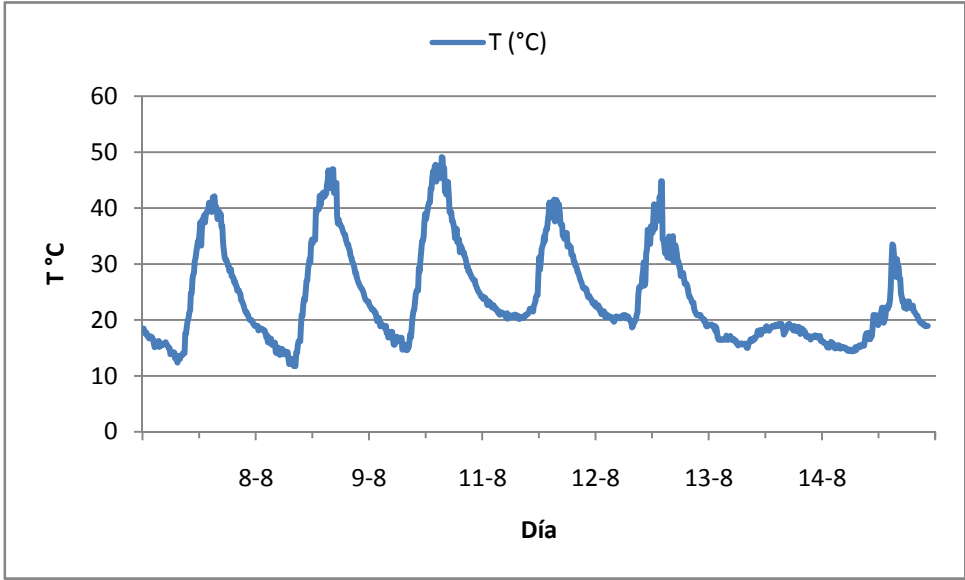
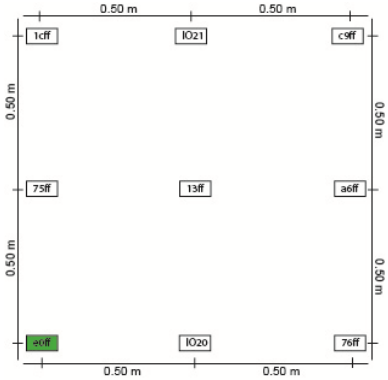


Gráfico 69: Temperaturas °C sensor e0ff (7-14/8/2015)

SENSOR EXTERIOR TEMPERATURA Y HUMEDAD		CS1	VALORES ESTAD. TEMPERATURA		
				T	HR
			MIN	11.600	11.100
Verano	Comienzo	7 agosto 22:20	MAX	50.200	77.600
			MEAN	24.390	47.750
	Fin	14 agosto 22:20	MEDIAN	20.400	55.000
			MODE	13.200	71.800
	Duración	7 días	STD	10.380	20.560
			RANGE	38.600	66.500

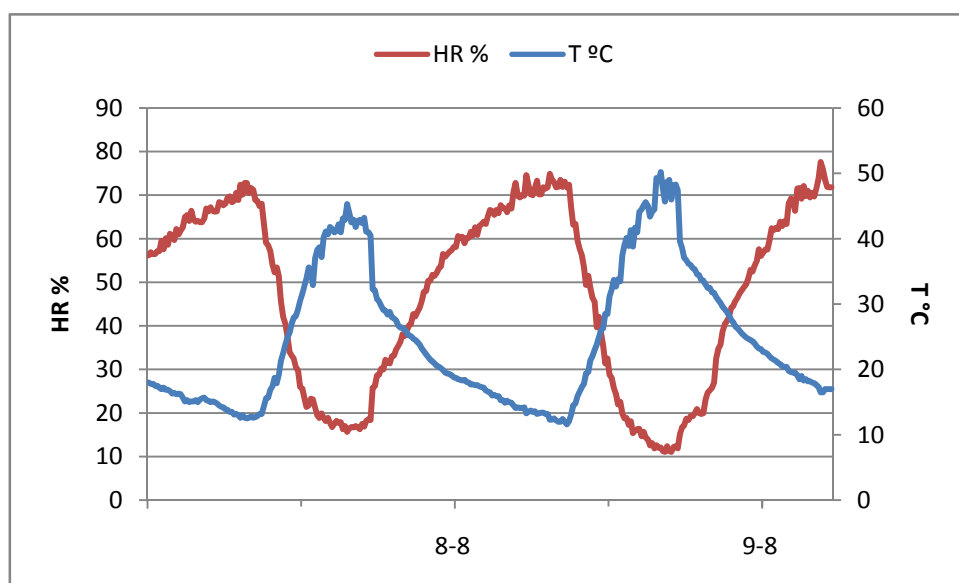
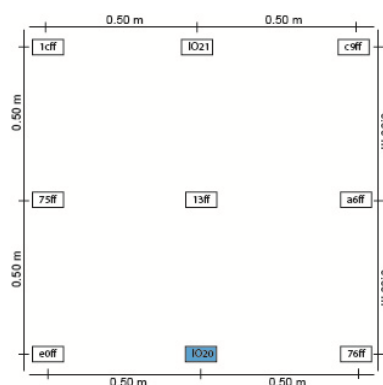


Gráfico 70: Temperaturas °C y humedad relativa % sensor IO20 (7-14/8/2015)

El IO20 dejó de funcionar la madrugada del 10 de Agosto. El conexionado es correcto por lo que se optó sustituir el sensor por el IO27.

SENSOR EXTERIOR TEMPERATURA Y HUMEDAD		CS1	VALORES ESTAD. TEMPERATURA		
				T	HR
			MIN	13.800	21.600
Verano	Comienzo	7 agosto 22:20	MAX	44.800	99.700
			MEAN	22.420	63.670
	Fin	14 agosto 22:20	MEDIAN	19.900	71.600
			MODE	18.400	75.200
	Duración	7 días	STD	6.957	18.630
			RANGE	31.000	78.100

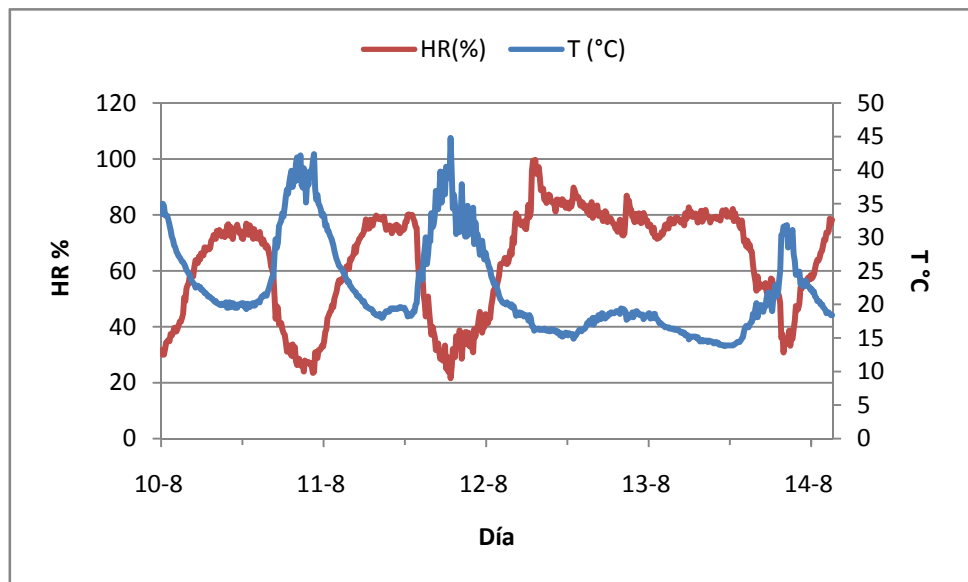
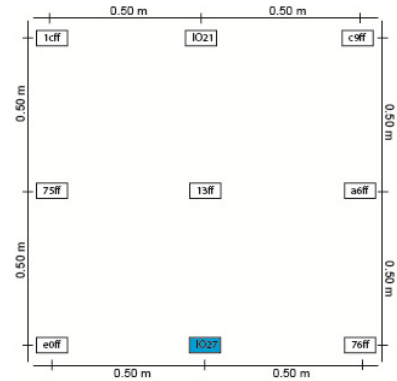
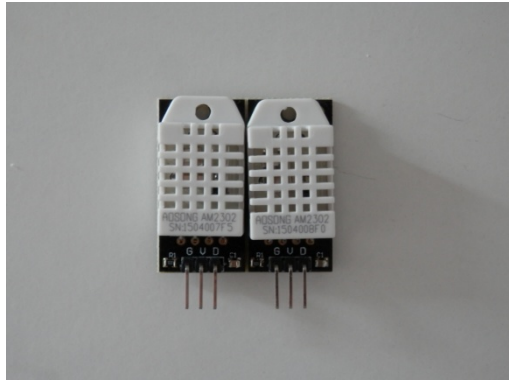


Gráfico 71: Temperaturas °C y humedad relativa % sensor IO27 (7-14/8/2015)

Este sensor entró en funcionamiento en 10 de agosto, en sustitución del IO20.

SENSOR INTERIOR TEMPERATURA		CS1	VALORES ESTADÍSTICOS	
			MIN	13.000
Verano	Comienzo	7 agosto 22:20	MAX	51.500
			MEAN	24.120
	Fin	14 agosto 22:20	MEDIAN	21.130
			MODE	20.500
	Duración	7 días	STD	8.549
			RANGE	38.500

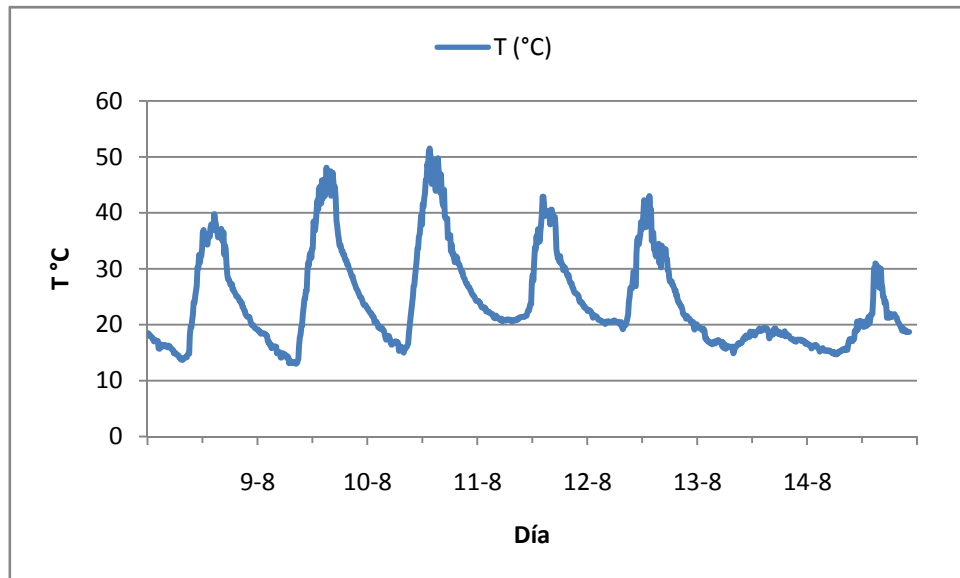
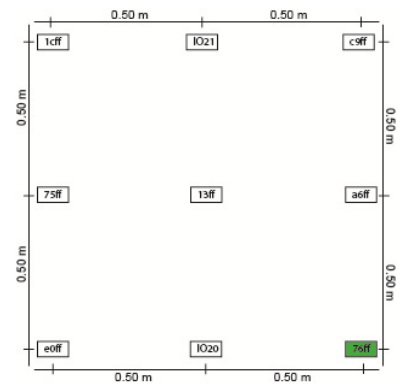


Gráfico 72: Temperaturas °C sensor 76ff (7-14/8/2015)

SENSOR INTERIOR TEMPERATURA Y HUMEDAD INTERIOR MURO		CS1	VALORES ESTAD. TEMPERATURA		
				T	HR
			MIN	21.000	46.800
Verano	Comienzo	7 agosto 22:20	MAX	26.800	50.100
			MEAN	-	-
	Fin	14 agosto 22:20	MEDIAN	-	-
			MODE	26.400	47.500
	Duración	7 días	STD	-	-
			RANGE	5.800	3.300

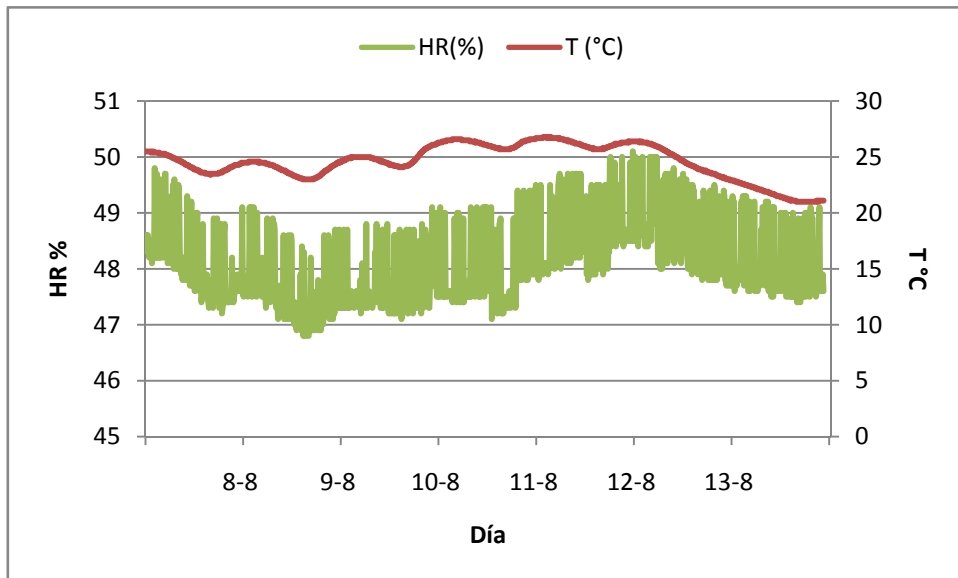
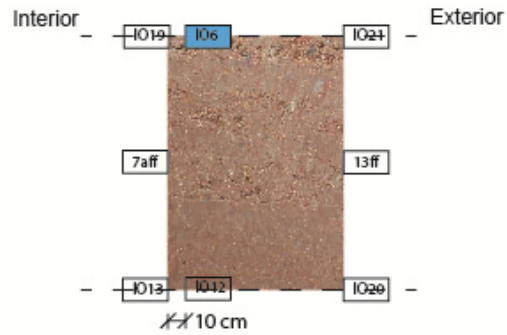
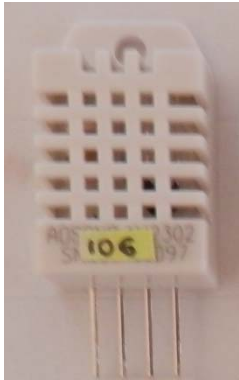


Gráfico 73: Temperaturas °C y humedad relativa % sensor IO6 (7-14/8/2015)

SENSOR INTERIOR TEMPERATURA Y HUMEDAD AMBIENTE INTERIOR		CS1	VALORES ESTAD. TEMPERATURA		
				T	HR
			MIN	21.100	31.300
Verano	Comienzo	7 agosto 22:20	MAX	27.500	61.300
			MEAN	23.540	47.260
	Fin	14 agosto 22:20	MEDIAN	23.400	48.300
			MODE	22.700	51.200
	Duración	7 días	STD	1.366	5.189
			RANGE	3.300	30.000

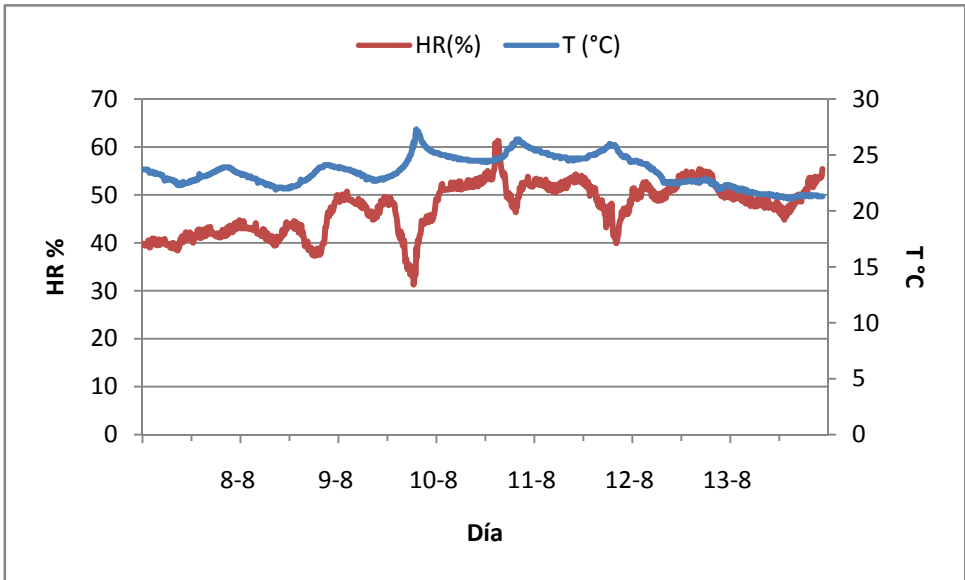


Gráfico 74: Temperaturas °C y humedad relativa % sensor IO16 (7-14/8/2015)

SENSOR INTERIOR TEMPERATURA Y HUMEDAD AMBIENTE EXTERIOR		CS1	VALORES ESTAD. TEMPERATURA		
				T	HR
			MIN	9.200	15.400
Verano	Comienzo	7 agosto 22:20	MAX	40.900	91.900
			MEAN	20.110	57.720
	Fin	14 agosto 22:20	MEDIAN	17.850	62.150
			MODE	11.700	33.300
	Duración	7 días	STD	7.850	21.510
			RANGE	31.700	76.500

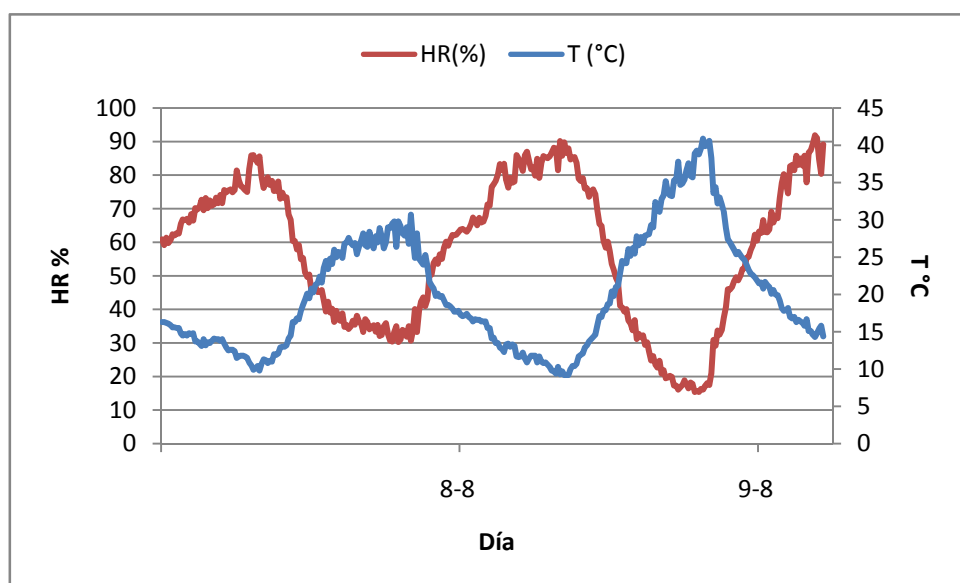
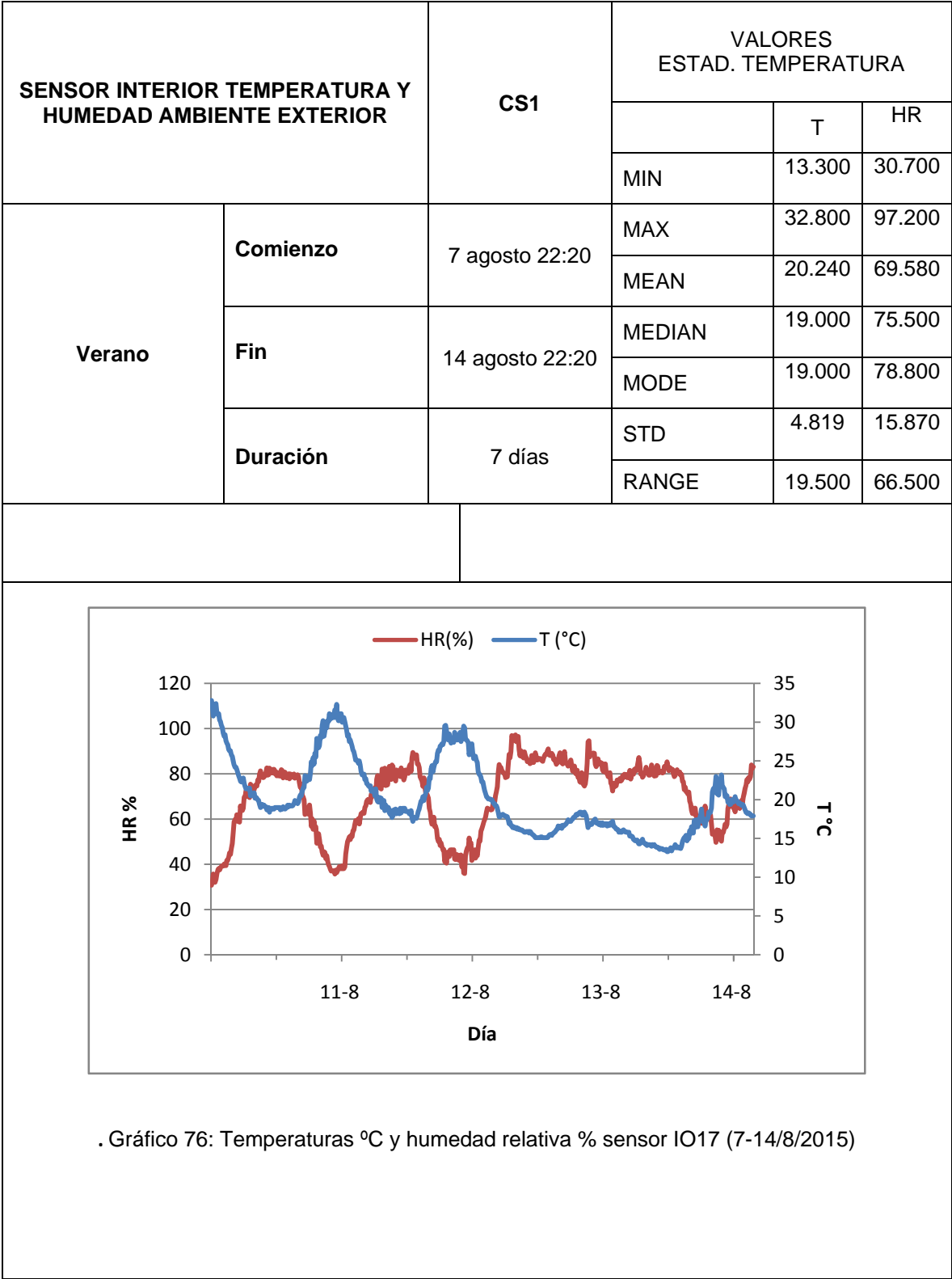


Gráfico 75: Temperaturas °C y humedad relativa % sensor IO26 (7-14/8/2015)

Sensor IO26 falló la madrugada del día 10 de Agosto debido a que estaba conectado a 3.3V en vez de 5V.





## BIBLIOGRAFÍA

Cte-He. 2ª rev ed. Madrid: Consejo Superior de los Colegios de Arquitectos de España, 2007 ISBN 978-84-935619-0-1.

AENOR. UNE-EN ISO 10456:2012 Materiales y Productos Para La Edificación. Propiedades Higrotérmicas. Valores Tabulados De Diseño y Procedimientos Para La Determinación De Los Valores Térmicos Declarados y De Diseño. (ISO 10456:2007). , 2012.

AENOR. UNE-EN ISO 13786:2011 Prestaciones Térmicas De Los Productos y Componentes Para Edificación. Características Térmicas Dinámicas. Métodos De Cálculo. (ISO 13786: 2007). , 2011.

AENOR. UNE 41410:2008 Bloques De Tierra Comprimida Para Muros y Tabiques. Definiciones, Especificaciones y Métodos De Ensayo. Madrid: , 2008.

AENOR. UNE-EN 12667:2002 Materiales De Construcción. Determinación De La Resistencia Térmica Por El Método De La Placa Caliente Guardada y El Método Del Medidor De Flujo De Calor. Productos De Alta y Media Resistencia Térmica. , 2002.

AENOR. UNE-EN 1946-2:1999 Prestaciones Térmicas De Los Productos y Componentes Para Edificios. Criterios Particulares Para La Evaluación De Los Laboratorios Que Miden Las Propiedades De Transmisión Térmica. Parte 2: Mediciones Por El Método De La Placa Caliente Protegida. , 1999.

AENOR. UNE-EN 1946-3:1999 Prestaciones Térmicas De Los Productos y Componentes Para Edificios. Criterios Particulares Para La Evaluación De Los Laboratorios Que Miden Las Propiedades De Transmisión Térmica. Parte 3: Mediciones Por El Método Del Medidor De Flujo Térmico. , 1999.

AENOR. UNE-EN ISO 7730:2006 Ergonomía Del Ambiente Térmico. Determinación Analítica e Interpretación Del Bienestar Térmico Mediante El Cálculo De Los Índices PMV y PPD y Los Criterios De Bienestar Térmico Local (ISO 7730:2005). .

AENOR. UNE-EN ISO 7345:1996 Aislamiento Térmico. Magnitudes Físicas y Definiciones. (ISO 7345:1987). .

AENOR. UNE 103101:1995 Análisis Granulométrico De Suelos Por Tamizado. .

AENOR. UNE 103102:1995 Análisis Granulométrico De Suelos Finos Por Sedimentación. Método Del Densímetro. .

AENOR. UNE 103103:1994 Determinación Del Limite Liquido De Un Suelo Por El Método Del Aparato De Casagrande. .

- AENOR. UNE 103104:1993 Determinación Del Límite Plástico De Un Suelo.
- AENOR. UNE-EN ISO 14688-1:2003 Ingeniería Geotécnica. Identificación y Clasificación De Suelos. Parte 1: Identificación y Descripción. (ISO 14688-1: 2002).
- AENOR. UNE-EN 1982:2009 Cobre y Aleaciones De Cobre. Lingotes y Piezas Fundidas.
- AENOR. UNE 103300:1993 Determinación De La Humedad De Un Suelo Mediante Secado En Estufa.
- AENOR. UNE 7050-2:1997 Tamices y Tamizado De Ensayo. Parte 2: Telas Metálicas, Chapas Perforadas y Láminas Electroformadas. Medidas Nominales De Las Aberturas. .
- ALGORRI, E. La Construcción Con Tierra En El Código Técnico De La Edificación. Centro de Estudios Benaventanos Ledo del Pozo., 2009.
- ANDROLINI, F. and FRANCONI, e. An Operative Protocol for Reliable Measurement of Moisture in Porous Material of Ancient Buildings., 2005.
- ANTELO TUDELA, E., SÁNCHEZ IGLESIAS, S., CRESPO GONZÁLEZ, C. and RAYA DE BLAS, A., 2012 Construir Con Tapial: Piscina En Toro.
- BAULUZ DEL RÍO, G. and BÁRCENA BARRIOS, P.<. Bases Para El Diseño y Construcción Con Tapial. Madrid: Centro de Publicaciones del Ministerio de Obras Públicas y Transportes, 1992 ISBN 84-7433-839-5.
- BOSH, M., NAVARRO, A. and ALLEPUZ, L. Proyecto Casa S-LOW: Construcción Del Prototipo y Experiencia Docente. Construcción Con Tierra. Patrimonio y Vivienda. X CIATTI. Congreso De Arquitectura De Tierra En Cuenca De Campos 2013. Valladolid: Cátedra Juan De Villanueva. Universidad De Valladolid., 2014. pp. 259-266 ISSN 978-84-617-0473-6.
- CASSINELLO PÉREZ, F. and Instituto de la Construcción y del Cemento "Eduardo Torroja". El Ladrillo y Sus Fábricas. 4ª ed. Madrid: Instituto Eduardo Torroja, 1971.
- CASTELLARNAU VISÚS, Á. and RIVAS, F.A. Construcción Con Tierra. Patrimonio y Vivienda. X CIATTI. Congreso De Arquitectura De Tierra En Cuenca De Campos 2013. Valladolid: Cátedra Juan De Villanueva. Universidad De Valladolid., 2014. pp. 97-108 ISSN 978-84-617-0473-6.
- CAVERO, D. and JOVÉ, F. Comportamiento Termodinámico De Muros De BTC En Función Del Clima. Construcción Con Tierra. Patrimonio y Vivienda. X CIATTI. Congreso De Arquitectura De Tierra En Cuenca De Campos 2013. Valladolid: Cátedra Juan De Villanueva. Universidad De Valladolid. pp. 247-258 ISSN 978-84-616-3485-9.

Chartered Institution of Building Services Engineers. Environmental design CIBSE Guide A. London: CIBSE, 1999 ISBN 0-900953-96-9.

DOMINGO DE MIGUEL, J. Evaluación Del Comportamiento Térmico e Higrotérmico De Cerramientos De Madera. E.T.S. ARQUITECTURA. UNIVERSIDAD DE NAVARRA: , 2012.

Equipo de Ahorro de Energía en la Edificación and Instituto de la Construcción y del Cemento "Eduardo Torroja". Bases Para El Diseño Solar Pasivo. Madrid: Instituto Eduardo Torroja, 1983 ISBN 84-7292-320-7.

ESCALAS RODRÍGUEZ, G. Diseño y Desarrollo De Un Prototipo De Riego Automático Controlado Con Raspberry Pi y Arduino. Universitat Politècnica de Catalunya: , 2014.

ESCALONA, V. Incidencia De La Inercia Térmica En Edificios De Uso Intermitente.

ESTÉVEZ, Á. and MARTÍN-LARA MORENO, S. Casa S-LOW. Sistema Innovador De Bioconstrucción Modular Con Entramado De Madera y Tapial. Construcción Con Tierra. Patrimonio y Vivienda. X CIATTI. Congreso De Arquitectura De Tierra En Cuenca De Campos 2013. Valladolid: Cátedra Juan De Villanueva. Universidad De Valladolid., 2013. pp. 247-258 ISSN 978-84-617-0473-6.

FERNÁNDEZ PALICIO, A. Arquitectura De Terra En Galicia. Tapia Na Terra De Lemos, Terróns Na Alta Limia, Muros Entramados De Pallabarro En Verín, Cob no Baixo Miño.

FERNÁNDEZ VÁZQUEZ, Ó. and IGLESIAS MARTÍNEZ, M.C. Procedimientos De Ensayo Para La Identificación De Las Prestaciones De Revocos De Barro. , 2013.

FIX, S. Viability of Rammed Earth Building Construction in Cold Climates, 2009.

FONT, F. and HIDALGO, P. La Tapia En España. Técnicas Actuales y Ejemplos. Informes De La Construcción, 2011, vol. 63, no. 523. pp. 21-34 ISSN 0020-0883.

FONT, F. and HIDALGO, P. Arquitecturas De Tapia. Castellón: Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Castellón, 2009 ISBN 978-84-613-3142-0.

FREIRE-TELLADO, M.J. Construcciones De Tapia En Las Tierras De Lemos.

GARCÍA, L., MILETO, C. and VEGAS, F. Las Técnicas Constructivas De Intervención En La Arquitectura De Tapia En El Período 1980-1985 a Través Del Archivo Del IPCE. Construcción Con Tierra. Patrimonio y Vivienda. X CIATTI. Congreso De Arquitectura De Tierra En Cuenca De Campos 2013. Valladolid: Cátedra Juan De Villanueva. Universidad De Valladolid., 2013. pp. 185-194 ISSN 978-84-616-3485-9.

GARCÍA-MORALES, S., LÓPEZ-GONZÁLEZ, L. and COLLADO-GÓMEZ, A. Metodología De Inspección Higrotérmica Para La Determinación De Un Factor De Intensidad De Evaporación En Edificios Históricos. Informes De La Construcción, 2013, vol. 64. pp. 69-78 ISSN 0020-0883.

GATANI, M. Ladrillos De Suelo-Cemento. Informes De La Construcción, 2000, vol. 51, no. 466. pp. 35-48 ISSN 0020-0883.

GATTI, F. Arquitectura y Construcción Con Tierra. Estudio Comparativo De Las Técnicas Contemporáneas En Tierra. , 2012.

GIANCOLA, E. El Comportamiento Energético De Una Fachada Ventilada De Juntas Abiertas. Universidad Politécnica de Madrid, 2010.

GONZÁLEZ CÁCERES, A. Evaluación De Herramientas De Simulación Energética: Estudio Del Caso De La Determinación De La Demanda De Calefacción En Viviendas En Concepción. UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO FACULTAD DE ARQUITECTURA, CONSTRUCCIÓN Y DISEÑO: , 2012.

GONZÁLEZ, M.J., SILVA, J. and VALBUENA, F. La Tierra y El Sol Como Elementos Básicos De La Arquitectura: Las Diez Viviendas De Amayuelas De Abajo, Palencia, España. Informes De La Construcción, 2003, vol. 55, no. 486.

GUIGOU FERNÁNDEZ, C. and Colegio Oficial de Arquitectos de Canarias. La Tierra Como Material De Construcción. 1ª ed. Colegio Oficial de Arquitectos de Canarias, 2002 ISBN 84-600-9721-8.

GUITIÁN OJEA, F., CARBALLAS FERNÁNDEZ, T., MUÑOZ TABOADELA, M. and Instituto de Investigaciones Agrobiológicas de Galicia. Suelos Naturales De La Provincia De Lugo. Santiago de Compostela: Instituto de Investigaciones Agrobiológicas de Galicia, 1982 ISBN 84-00-05174-2.

HALL, M.A. Assessing the Moisture-Content-Dependent Parameters of Stablished Earth Materials using the Cyclic-Response Admittance Method. Energy and Buildings, 2008, vol. 40, no. 11 ISSN 0378-7788.

HEATHCOTE, K. The Thermal Performance of Earth Buildings, 2011.

HUTTON, T. Monitoring Britain's Heritage., 1996.

Instituto de la Construcción y del Cemento "Eduardo Torroja". Humedad De Los Áridos. Madrid: Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento, 1978 ISBN 84-7292-289-8.

Instituto de la Construcción y del Cemento "Eduardo Torroja". Análisis Granulométrico De Áridos. Madrid: Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento, 1978 ISBN 84-7292-286-3.

Instituto Eduardo Torroja. Prescripciones Del Instituto Eduardo Torroja PIET-70. Madrid: , 1971.

JIMÉNEZ, C. Arquitectura De Tierra "New Gourn. Hassan Fathy". VII Congreso De Tierra En Cuenca De Campos, Valladolid 2010/2011, 2011 ISSN 978-84-694-8107-3.

A. JORDÁN. Soil System Sciences. Available from:<http://blogs.egu.eu/divisions/sss/2014/03/30/soil-color-never-lies/>.

MAG, A.v. and RAUCH, M. Paredes De Tapial y Su Industrialización. Informes De La Construcción, 2011, vol. 63, no. 523. pp. 35-40.

MARTÍNEZ CORTIZAS, A. and PÉREZ ALBERTI, A. Atlas Climático De Galicia. Xunta de Galicia, 1999 ISBN 84-453-2611-2.

MARTÍNEZ LOMAS, D. Sistema De Monitorización y Adquisición De Datos De Bajo Coste. Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla: .

MASSARI, G. Risanamento Igienico Dei Locali Umidi Milano. Ulrico Hoepli Editore, 1959.

MIGUEL PERNAS, R. and PINTOS PENA, S. Soluciones Constructivas Para La Adaptación Al Medio De La Vivienda De Interior De Galicia. , 2014.

MILETO, C. and VEGAS, F. La Restauración De La Tapia En La Península Ibérica : Criterios, Técnicas, Resultados y Perspectivas. Valencia: General de Ediciones de Arquitectura, 2014 ISBN 978-84-942233-3-4; 9789728479831.

MINKE, G. Revoques De Barro :Mezclas, Aplicaciones y Tratamientos. Barcelona: Icaria, 2014 ISBN 978-84-9888-570-5.

MINKE, G. Building with Earth :Design and Technology of a Sustainable Architecture. Basel etc.: Birkhäuser, 2006 ISBN 3764374772.

MINKE, G. Manual De Construcción De Tierrala Tierra Como Material De Construcción y Su Aplicación En La Arquitectura Actual. Montevideo: Nordan comunidad, 2001 ISBN 9974-42-078-4.

MORENILLA VICENTE, J. Materiales Para La Bioconstrucción. Cercha, 2011, no. 108. pp. 68-73 ISSN 9943-7376.

NEVES, C.M., et al.Selección De Suelos y Métodos De Control En La Construcción Con Tierra. Proyecto de investigación PROTERRA del CYTED, 2009.

NEVES, C.M.M., et al. Selección De Suelos y Métodos De Control En La Construcción Con Tierra – Prácticas De Campo.[Http://www.Redproterra.Org](http://www.Redproterra.Org), 2009.

PERIAGO CARRETERO, F., TORNERO FRANCO, J., PÉREZ NAVARRO, J. and Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de la Región de Murcia. Guía De Materiales Para Una Construcción Sostenible. Murcia: Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de la Región de Murcia, 2008 ISBN 978-84-89882-36-3.

RAMOS MAÑANA, L. and IGLESIAS MARTÍNEZ, M.C. Análisis De La Sostenibilidad De La Construcción Con Tierra. , 2009.

RODRÍGUEZ LLEDÓ, C. and Equipo de Arquitecturas Adaptadas al Medio </p>. Guía De Bioconstrucción :Sobre Materiales y Técnicas Constructivas Saludables y De Bajo Impacto Ambiental : Con Directorio Comercial, Descripción De Sistemas y Detalles Constructivos. Madrid: Mandala, 2005 ISBN 84-96439-54-2.

ROMÁN, C.A.A. Estudio Experimental De Las Condiciones De Confort Relacionadas Con Parámetros Higrotérmicos y Calidad Del Aire. Universidad Politécnica de Madrid., 2005.

ROTONDARO, R. Arquitectura De Tierra Contemporánea: Tendencias y Desafíos. Programa De Investigación Arquitectura Construcción Con Tierra. ARCONTI. Facultad De Arquitectura y Urbanismo Buenos Aires., 2007.

RUITORT, A. Fundamentos De Historia Del Arte. Playor, 1987.

S. Bestraten (\*), E. Hormías (\*\*), A. Altemir (\*). Construcción Con Tierra En El Siglo XXI Earthen Construction in the 21st Century. Informes De La Construcción, julio-septiembre 2011, vol. 63, 523, 5-20 ISSN 1988-3234/0020-0883.

SAMPAIO, S., GOMES, M. and BORGES-ABEL, A. Analysis of the Earth Construction's Thermal Behaviour in Situ Measurement and Evaluation of Thermal Performance of Three Earth Case Studies.Construcción Con Tierra. Patrimonio y Vivienda. X CIATTI. Congreso De Arquitectura De Tierra En Cuenca De Campos 2013. Valladolid: Cátedra Juan De Villanueva. Universidad De Valladolid., 2014, 2013. pp. 331-340 ISSN 978-84-617-0473-6.

SÁNCHEZ GARCÍA, Á. Desarrollo De Un Sistema De Un Sistema Electrónico Para La Monitorización De Variables Ambientales En Huertos Urbanos. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial. Universidad Politécnica de Cartagena.: .

SÁNCHEZ TORRECILLA, J.R. Sistema De Monitorización y Telegestión Remota Basado En Arduino Para Smart Buildings. Universidad Politécnica de Valencia: , 2014.

Sirewall. Sirewall. Estructural Insulated Rammed Earth. the Art And Science of Rammed Earth. Available from:<http://sirewall.com/>.

Sirewall. Available from:<http://sirewall.com/>.

SUÁREZ BALDONEDO, M. and Consello Galego de Colexios de Aparelladores e Arquitectos Técnicos. Construcción Con Tierra. Santiago de Compostela: Consello Galego de Colexios de Aparelladores e Arquitectos Técnicos, 2006.

SUÁREZ, J. Bioconstrucción, Propuestas Para Una Edificación Sostenible. Cuadernos De Pedagogía, 2010, no. 400. pp. 59-62 ISSN 0210-0630.

Sublette County Library. Available from:<http://www.sublettecountylibrary.org/>.

SZOKOLAY, S.V. Introduction to Architectural Science the Basis of Sustainable Design. Amsterdam: Elsevier, 2004 ISBN 0-7506-5849-5.

URKÍA, I. and URKÍA, S. Energía Renovable Práctica. Editorial Pamiela ed., 2003 ISSN 84-7681-377-5.

VARGAS, J., TORREALVA, D. and BLONDET, M. Construcciones Saludables y Sismorresistentes De Adobe Reforzado Con Geomallas. Fondo Editorial ed., 2007 ISSN 978-9972-42-837-12445.